

**République Algérienne Démocratique et Populaire**  
**Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique**  
**Université 8 Mai 1945 Guelma**



**Faculté : Sciences et technologies**  
**Département : Electronique et télécommunications**

# **Polycopie**

De

## **Travaux Pratiques**

3<sup>ème</sup> Année Licence en Télécommunications

**Pour la matière :**

**Communication analogique**

Présentée par :

**Dr. GHADJATI Mohamed**  
Maître de conférence classe – B  
Université 8 mai 1945 – Guelma

**Année Universitaire : 2019/2020**

## **Préface :**

Ce manuscrit de Travaux Pratique de module Communication analogique est dédié aux étudiants de troisième (03) année Licence Télécommunications/Electroniques. L'objectif de cette brochure est de fournir un support de TP tout en visant une meilleure exploitation du matériel pédagogique disponible au niveau de notre département, plus particulièrement au niveau du laboratoire (1) de télécommunication. Ce polycopie contient quatre travaux pratiques (TP) :

**TP N° 01** : *Oscillateurs radiofréquences RF*, ce TP ne figure pas dans le canevas, toutefois, il remplace le TP N° 03 du canevas intitulé *Transposition de fréquence : Mélangeurs*. La raison pour cette substitution est la non disponibilité du matériel correspondant au TP des mélangeurs figurant sur le canevas.

**TP N° 02** - *Modulation / Démodulation AM* : Mettre en œuvre, étudier, analyser et comprendre les techniques de modulation/démodulation d'amplitude.

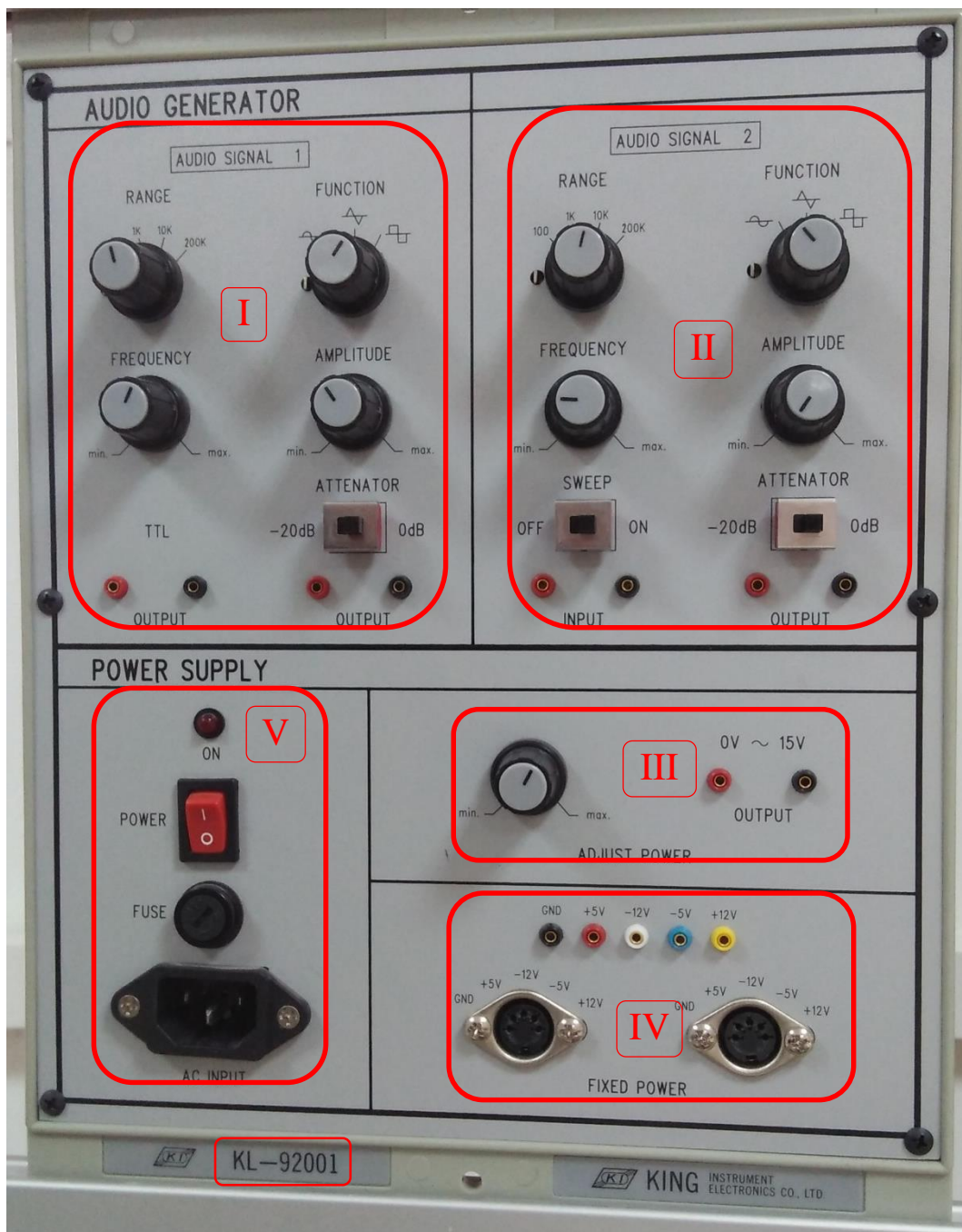
**TP N° 03** - *Modulation / Démodulation FM* : Ce TP est consacré à la mise en œuvre, l'étude, l'analyse et la compréhension des techniques de modulation/démodulation de fréquence. On trouve entre autres, la mesure des paramètres pertinents et la comparaison avec la modulation analogique.

**TP N° 04** - *Synthétiseur de fréquence à base du circuit PLL* : Etude d'une boucle à verrouillage de phase (Phase Locked Loop : PLL), Caractériser le comparateur de phase utilisé. Réalisation d'une application du circuit PLL, à savoir le synthétiseur de fréquence.

À la fin de ces travaux pratiques, l'étudiant aura une idée claire sur les oscillateurs de Colpitts et de Hartley. Il sera capable d'analyser les différents circuits de modulation AM et FM, ainsi que l'interprétation des paramètres de chaque modulation. Le circuit PLL est également évoqué, avec une mise en œuvre au sein d'un circuit synthétiseur de fréquence.

# I. Equipements utilisés dans les TPs de communications analogiques

## I.1. Carte KL-92001 : Générateur des signaux

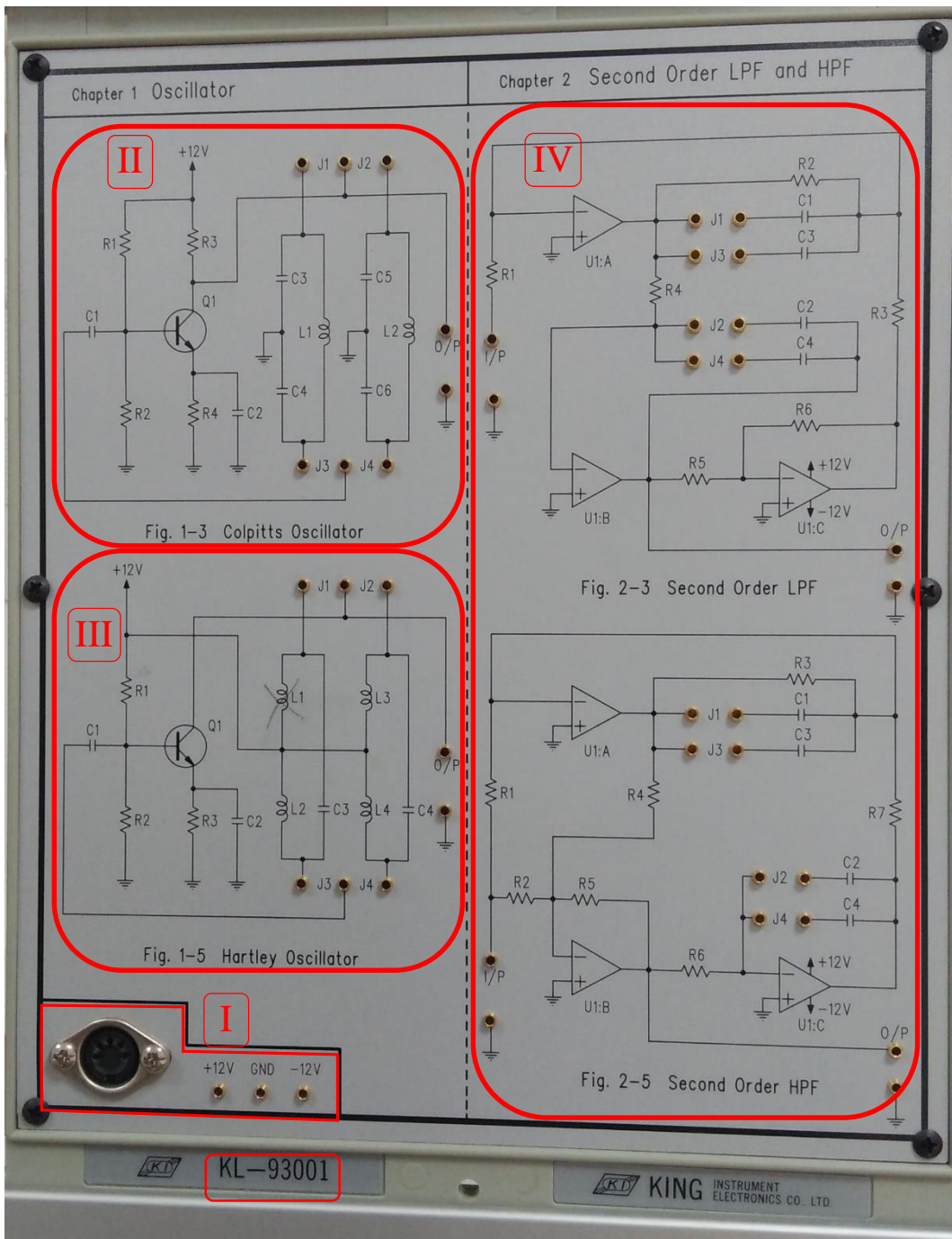


Cette carte comporte cinq modules, à savoir :

1. **Module (I et II)** : Générateur du signal alternatif (sinusoïdal, rectangulaire, triangulaire) à fréquence et amplitude réglables.
2. **Module (III)** : Générateur de tension continue entre 0 et 15 V.
3. **Module (IV)** : Alimentation pour les autres cartes **GND**, **±5V**, **±12V**, avec deux types de câblage.

4. **Module (V)** : Alimentation de la carte générateur par l'alimentation du réseau.

### I.2. Carte KL-93001 : oscillateurs



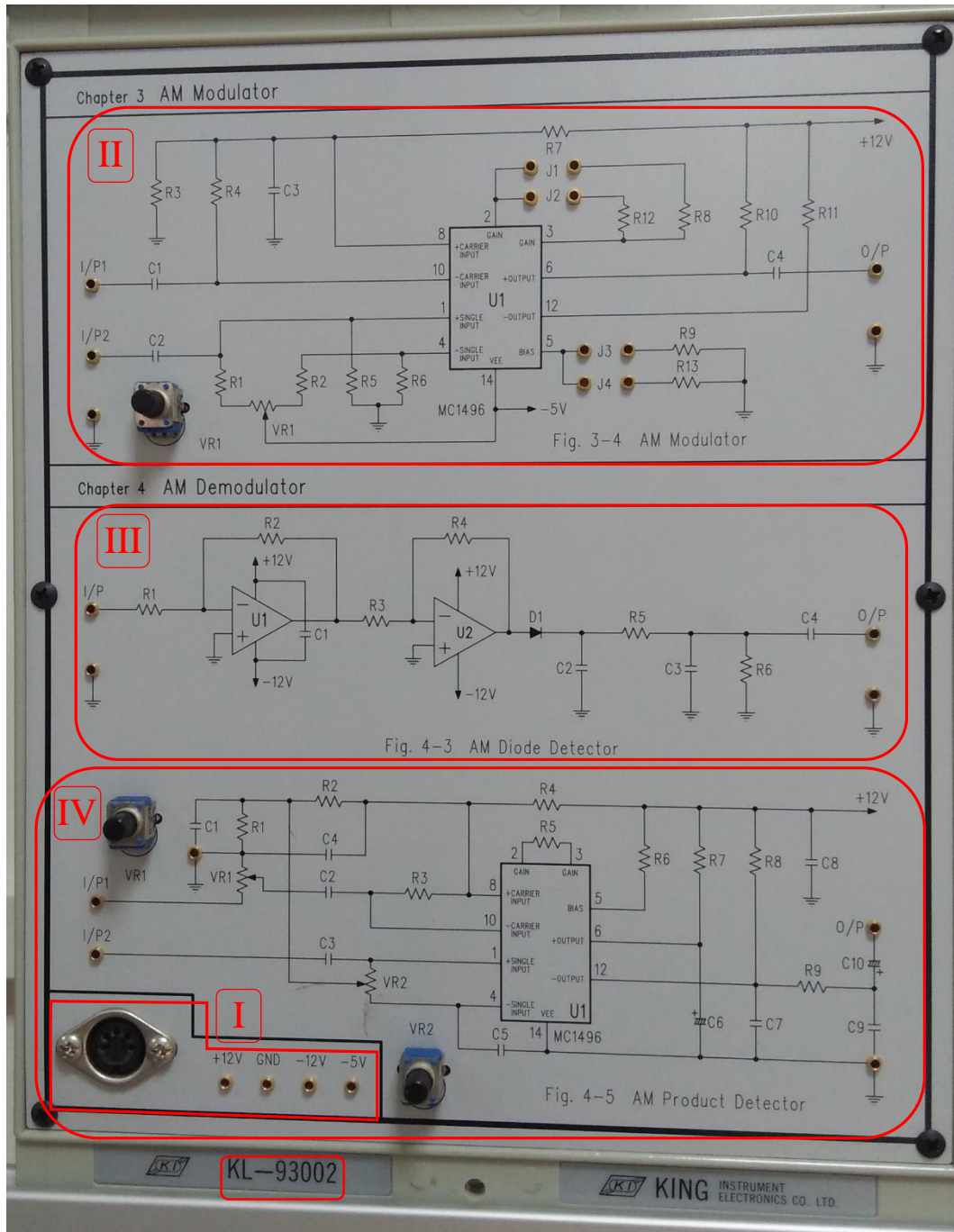
Cette carte comporte quatre modules, à savoir :

1. **Module (I)** : Alimentation de la carte.
2. **Module (II)** : Oscillateur de Colpitts.
3. **Module (III)** : Oscillateur de Hartley.



4. **Module (IV)** : la partie du filtrage comporte deux filtres de deuxième ordre, un filtre passe-bas et un filtre passe-haut. Toutefois, cette partie est en dehors des intérêts de ce TP.

### I.3. Carte KL-93002 : Modulateur/Démodulateur AM

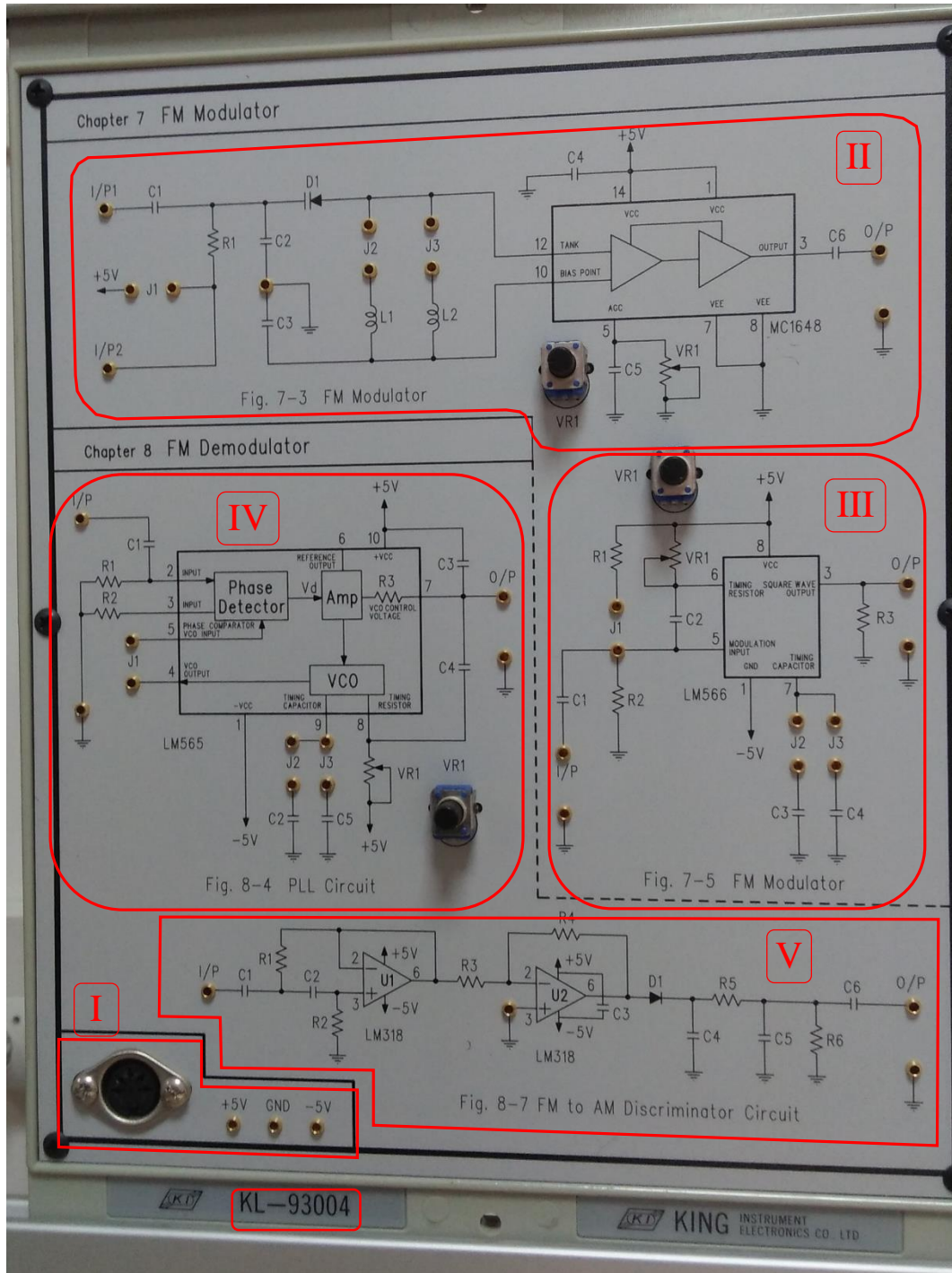


Cette carte comporte quatre modules, à savoir :

1. **Module (I)** : Alimentation de la carte.
2. **Module (II)** : Modulateur AM.

3. **Module (III)** : Circuit de démodulation AM par détection synchrone. On utilise durant ce TP, ce démodulateur.
4. **Module (IV)** : Démodulateur AM à détection de diode. Cette section est hors intérêts de ce TP.

I.4. Carte KL-93004 : Modulateur/Démodulateur FM



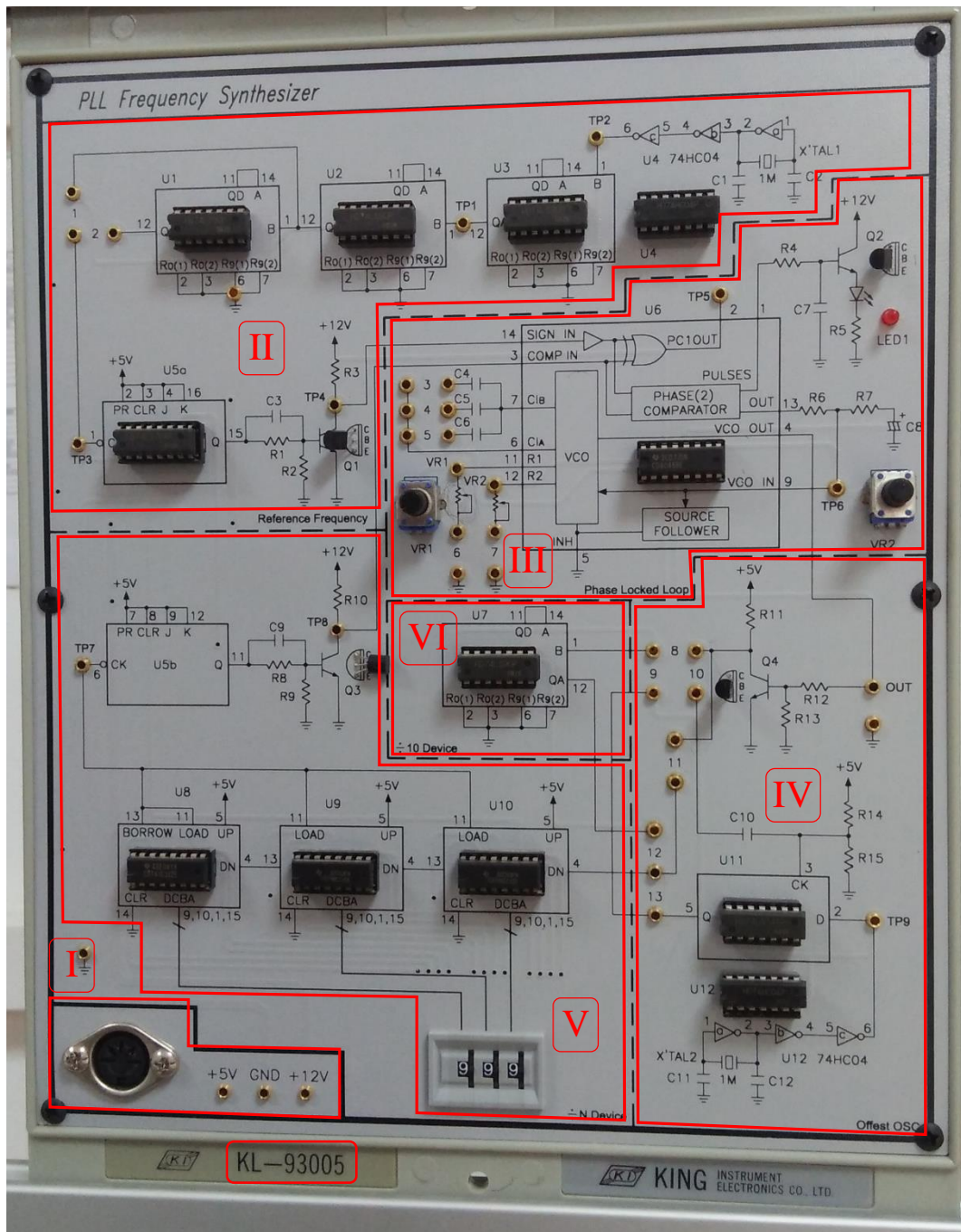
Cette carte comporte cinq modules, à savoir :

- 1. Module (I) :** Alimentation de la carte.
- 2. Module (II) :** Modulateur FM à base du circuit MC1648. On utilise durant ce TP, ce circuit démodulateur.
- 3. Module (III) :** Modulateur FM à base du circuit LM566. Cette section est hors intérêts de ce TP.
- 4. Module (IV) :** Démodulateur FM à base du circuit PLL. Cette section est hors intérêts de ce TP.
- 5. Module (V) :** Démodulateur FM à base de conversion FM-AM. On utilise durant ce TP, ce circuit démodulateur.

### *I.5. Carte KL-93005 : Synthétiseur de fréquence à base de PLL*

Cette carte comporte six modules, à savoir :

- 1. Module (I) :** Alimentation de la carte.
- 2. Module (II) :** Oscillateur à 1 MHz, avec division de fréquence sur 10, 100, 1000, 2000.
- 3. Module (III) :** Circuit PLL.
- 4. Module (IV) :** Circuit offset OSC.
- 5. Module (V) :** Diviseur de fréquence par N.
- 6. Module (VI) :** Diviseur de fréquence par 10.







## TP 1 – Oscillateurs radiofréquences RF

### I. Objectif du TP :

- Comprendre le principe d'un oscillateur radiofréquence (RF).
- Comprendre le fonctionnement de l'oscillateur radiofréquence (RF).
- Conception et implémentation d'un oscillateur.

### II. Equipements nécessaires :

- Carte KL-92001.
- Carte KL-93001.
- Oscilloscope.
- Multimètre LCR.

### III. Rappel théorique

Un oscillateur est un générateur de signaux qui convertit sa tension d'alimentation continue (DC) en un signal de sortie périodique (AC) sans aucun signal d'entrée. Les oscillateurs jouent des rôles très importants dans les systèmes de communication. Ils sont principalement utilisés pour générer la porteuse nécessaire pour les systèmes de modulation, ou aussi le signal d'oscillation local utilisé dans un système de communication.

#### III.1. Principe de l'oscillateur

La **Figure 1** montre le schéma d'un oscillateur. Il comprend un amplificateur et un réseau de rétroaction construit par un résonateur. Lorsque l'alimentation continue est appliquée pour la première fois au circuit, un bruit apparaît et est amplifié par l'amplificateur, puis envoyé à l'entrée via un circuit de contre-réaction qui est un circuit résonnant avec une fonction de filtrage. Le circuit de contre-réaction ne laisse passer qu'un signal avec la fréquence de résonance de et bloque les autres fréquences. Le signal de retour sera amplifié et réinjecté à l'entrée de l'oscillateur. Si le signal de contre-réaction est en phase avec le signal en entrée et le gain en tension est suffisant, l'oscillateur sera opérationnel.

Pour un fonctionnement correct, un oscillateur doit répondre au critère de Barkhausen. Le critère de Barkhausen est la relation entre le gain  $A$  de l'amplificateur et le facteur de contre-réaction  $\beta(s)$  de l'oscillateur et doit être égal à 1 :

$$A.\beta(s) \geq 1 \quad (1.1)$$

Avec  $A$  : gain de l'amplificateur,  $\beta(s)$  : facteur du circuit de contre-réaction.

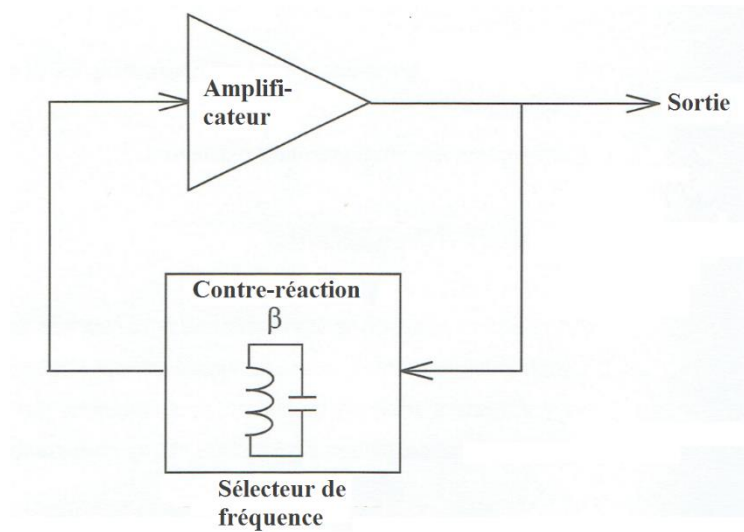


Figure 1. Schéma bloc d'un oscillateur

### III.2. Oscillateur de Colpitts

Un circuit équivalent en courant alternatif (AC) de l'oscillateur Colpitts est illustré sur la **Figure 2**. Puisque le circuit résonnant parallèle LC est connecté entre la base et le collecteur du transistor, une tension de contre-réaction partielle est envoyée à l'émetteur via le diviseur de tension constitué par  $C_1$  et  $C_2$ . Dans ce circuit, la résistance  $R$  représente la somme de la résistance de sortie du transistor, de la résistance de charge et de la résistance équivalente de la bobine et des condensateurs. La fréquence d'oscillation de l'oscillateur de Colpitts peut être calculée par la formule suivante :

$$f_0 = \frac{1}{2\pi \sqrt{L \left( \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2} \right)}}, \quad (\text{Hz}) \quad (1.2)$$

Le facteur  $\beta$  de la contre-réaction est  $C_1/C_2$  et le gain en tension  $A$  est  $g_m R$ . Par substitution l'équation (1) on obtient :

$$g_m R = \frac{C_2}{C_1} \quad (1.3)$$

Pour démarrer l'oscillation, le gain de boucle doit être au moins 1 afin que la condition d'oscillation puisse être exprimée par :

$$g_m R \geq \frac{C_2}{C_1} \quad (1.4)$$

La **Figure 3** montre n circuit pratique de l'oscillateur de Colpitts.

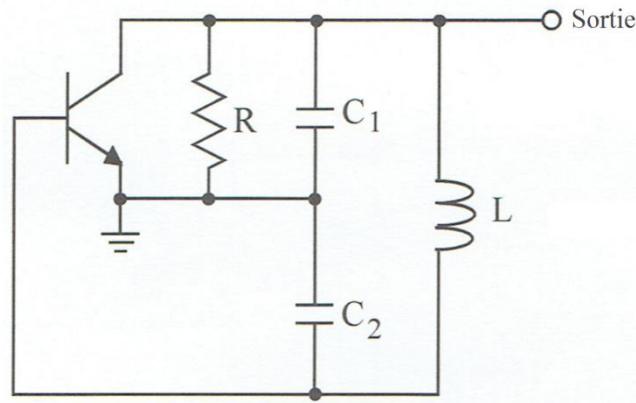


Figure 2. Schéma équivalent en AC de l'oscillateur de Colpitts

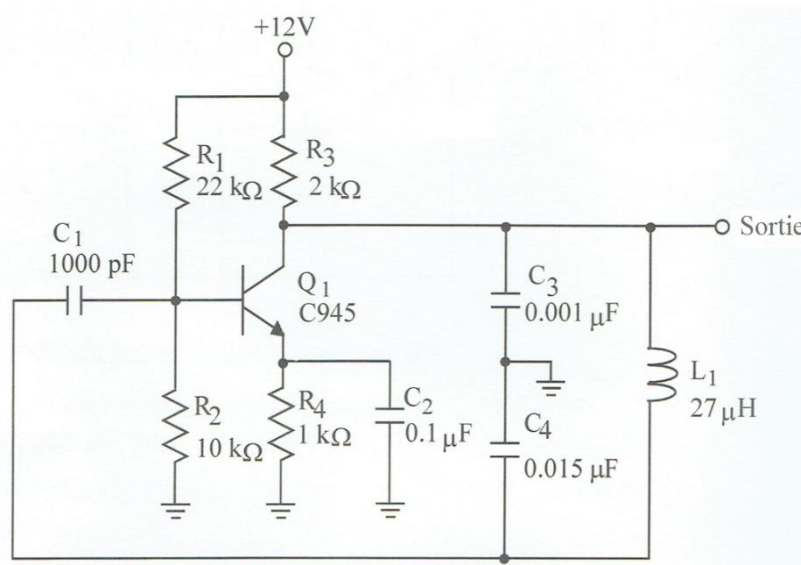


Figure 3. Circuit de l'oscillateur de Colpitts

### III.3. Oscillateur de Hartley

Le circuit équivalent en courant alternatif (AC) de l'oscillateur Hartley, illustré sur la **Figure 3**, est similaire à l'oscillateur Colpitts. Le circuit résonant LC parallèle est connecté entre le collecteur et la base, cependant, deux bobines  $L_1$  et  $L_2$  sont utilisés à la place des condensateurs. La résistance  $R$  représente la somme de la résistance en sortie du transistor, de la résistance de charge et de la résistance équivalente des bobines et du condensateur.

La fréquence d'oscillation est déterminée par les valeurs des composants du circuit de résonance parallèle et peut être calculée par la formule :

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{(L_1 + L_2)C}}, \quad (\text{Hz}) \quad (1.5)$$

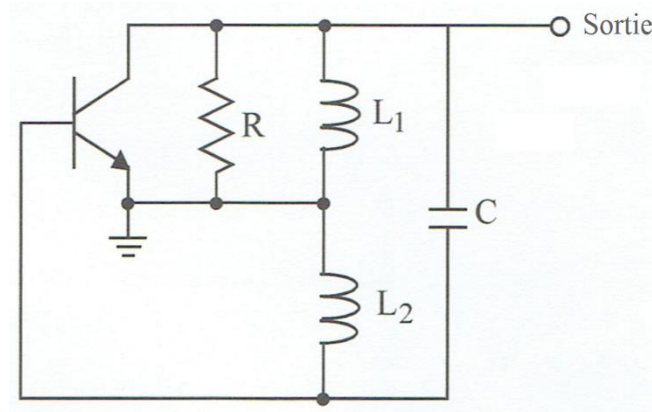
Le facteur  $\beta$  de la contre-réaction est  $L_2/L_1$  et le gain en tension  $A$  est  $g_m R$ . Par substitution l'équation (1) on obtient :

$$g_m R = \frac{L_1}{L_2} \quad (1.6)$$

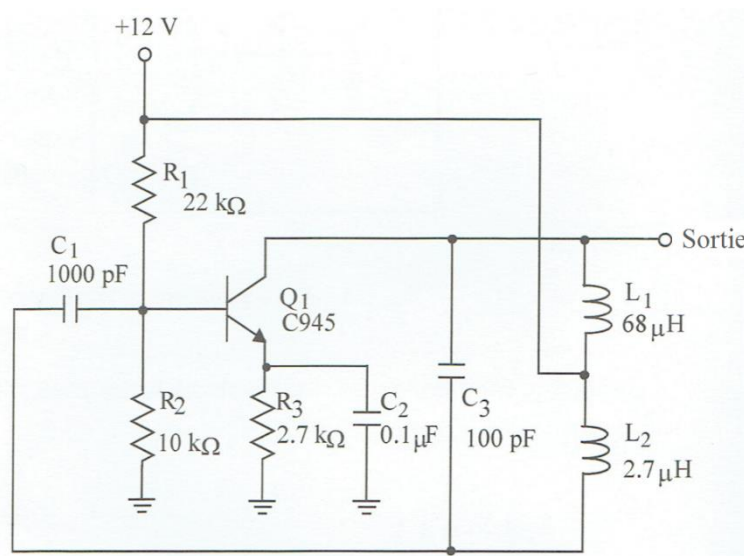
Pour démarrer l'oscillation, le gain de boucle doit être au moins 1 afin que la condition d'oscillation puisse être exprimée par :

$$g_m R \geq \frac{L_1}{L_2} \quad (1.7)$$

À l'exception des oscillateurs mentionnés ci-dessus, il existe de nombreux autres types d'oscillateurs pour des applications pratiques tels que l'oscillateur RC à décalage de phase et à l'oscillateur à pont de Wein pour les basses fréquences, les oscillateurs de Clapp et de Pierce pour une grande stabilité. En général, l'oscillateur de Pierce est le plus utilisé dans les applications à haute fréquence en raison de l'utilisation d'un cristal à faible consommation d'énergie et d'un facteur Q très élevé et plus stable. La **Figure 5** montre un circuit pratique de l'oscillateur de Hartley.



**Figure 4.** Schéma équivalent en AC de l'oscillateur de Hartley



**Figure 5.** Circuit de l'oscillateur de Hartley



## IV. Partie pratique

### IV.1. Manipulation 1 : Oscillateur de Colpitts

1. Localiser le circuit oscillateur de Colpitts sur la carte KL-93001. Placer les connecteurs sur les positions J1 et J3 pour régler  $C_3$  à  $0.001 \mu\text{F}$ ,  $C_4$  à  $0.015 \mu\text{F}$  et  $L_1$  à  $27 \mu\text{H}$ .
2. Réglez l'entrée verticale de l'oscilloscope en position AC et connectez-la aux bornes de sortie (O/P). Observer et enregistrer la forme d'onde et la fréquence dans le **Tableau 1**. Si le circuit ne fonctionne pas correctement, vérifiez à nouveau la polarisation CC du transistor.
3. Retirez les connecteurs de J1 et J3. À l'aide du multimètre LCR, mesurez les valeurs de  $C_3$ ,  $C_4$  et  $L_1$  et enregistrez les résultats dans le **Tableau 1**, puis calculez la fréquence de sortie.
4. Insérez les connecteurs dans J2 et J4 pour changer  $C_3$  en  $C_5$  ( $100 \text{ pF}$ ),  $C_4$  en  $C_6$  ( $1000 \text{ pF}$ ) et  $L_1$  to  $L_2$  ( $2,7 \mu\text{H}$ ). Répétez les étapes 2 et 3.

### IV.2. Manipulation 2 : Oscillateur de Hartley

1. Localiser le circuit oscillateur de Hartley sur la carte KL-93001. Placer les connecteurs sur les positions J1 et J3 pour régler  $L_1$  à  $68 \mu\text{H}$ ,  $L_2$  à  $2.7 \mu\text{H}$  et  $C_3$  à  $100 \text{ pF}$ .
2. Réglez l'entrée verticale de l'oscilloscope en position AC et connectez-la aux bornes de sortie (O/P). Observer et enregistrer la forme d'onde et la fréquence dans le **Tableau 2**. Si le circuit ne fonctionne pas correctement, vérifiez à nouveau la polarisation CC du transistor.
3. Retirez les connecteurs de J1 et J3. À l'aide du multimètre LCR, mesurez les valeurs de  $C_3$ ,  $C_4$  et  $L_1$  et enregistrez les résultats dans le **Tableau 2**, puis calculez la fréquence de sortie.
4. Insérez les connecteurs dans J2 et J4 pour changer  $C_3$  en  $C_4$  ( $150 \text{ pF}$ ),  $L_1$  en  $L_3$  ( $47 \text{ pF}$ ) et  $L_2$  to  $L_4$  ( $470 \mu\text{H}$ ). Répétez les étapes 2 et 3.

## V. Questions et conclusions (à rendre dans un rapport)

1. Dans les manipulations (a) et (b), les valeurs calculées et mesurées du signal de sortie correspondent-elles ? Explique.
2. Quelle est la fonction de chaque condensateur ou bobine du circuit oscillateur de Colpitts illustré à la **Figure 3** ?
3. Déterminer les valeurs de  $C_3$ ,  $L_1$  et  $L_2$  de l'oscillateur Hartley montré dans la **Figure 5** pour la fréquence d'oscillation de  $5 \text{ MHz}$ .
4. Lorsque la fréquence de fonctionnement est dans la gamme des radiofréquences, pourquoi devons-nous faire attention à la disposition du circuit et à la longueur du fil ?

**NB** : toute ressemblance dans les comptes rendu du TP conduit systématiquement à une note éliminatoire.

**Tableau. 1**

	C <sub>3</sub>	C <sub>4</sub>	L <sub>1</sub>	Forme d'onde du signal de sortie
Valeur nominale	0.001 µF	0.015 µF	27 µH	
Valeur mesurée				
Valeur nominale	100 pF	1000 pF	2.7 µH	
Valeur mesurée				

**Tableau. 2**

	L <sub>1</sub>	L <sub>2</sub>	C <sub>3</sub>	Forme d'onde du signal de sortie
Valeur nominale	68 µH	2.7 µH	100 pF	
Valeur mesurée				
Valeur nominale	470 µH	47 µH	150 pF	
Valeur mesurée				



## TP 2 - Modulation / Démodulation AM

### I. Objectif du TP

- Comprendre le principe de la modulation d'amplitude (AM).
- Comprendre la forme d'onde et le spectre de fréquence du signal AM, ainsi que le calcul de l'indice de modulation.
- Conception d'un modulateur AM à l'aide du circuit MC1496.
- Comprendre le principe de la démodulation AM.
- Implémenter deux types de démodulateurs synchrone et asynchrone.

### II. Equipements nécessaires

- Carte KL-92001.
- Carte KL-93002.
- Oscilloscope.
- Analyseur de spectre.
- Générateur RF.

### III. Rappel théorique

#### III.1. Modulation d'amplitude

Dans la modulation d'amplitude, l'amplitude de la porteuse varie en fonction de l'amplitude du signal modulant, qui est le signal porteur d'information. Le signal modulé en amplitude est exprimé comme suit :

$$\begin{aligned}x_{AM}(t) &= [A_{DC} + A_m \cos(2\pi f_m t)] A_p \cos(2\pi f_p t) \\ &= A_{DC} A_p [1 + m \cos(2\pi f_m t)] \cos(2\pi f_p t) \\ &= \frac{1}{2} A_{DC} A_p m \left\{ \cos[2\pi(f_p + f_m)t] + \cos[2\pi(f_p - f_m)t] \right\} + \\ &\quad A_{DC} A_p \cos(2\pi f_p t)\end{aligned}\tag{2.1}$$

Où :

$A_{DC}$  : amplitude de la composante continue

$A_m$  : amplitude du signal modulant

$A_p$  : amplitude de la porteuse

$f_m$  : fréquence du signal modulant

$f_p$  : fréquence de la porteuse

$m$  : indice de modulation

Lorsque  $m$  est un pourcentage, il est souvent appelé le pourcentage de modulation et défini par :

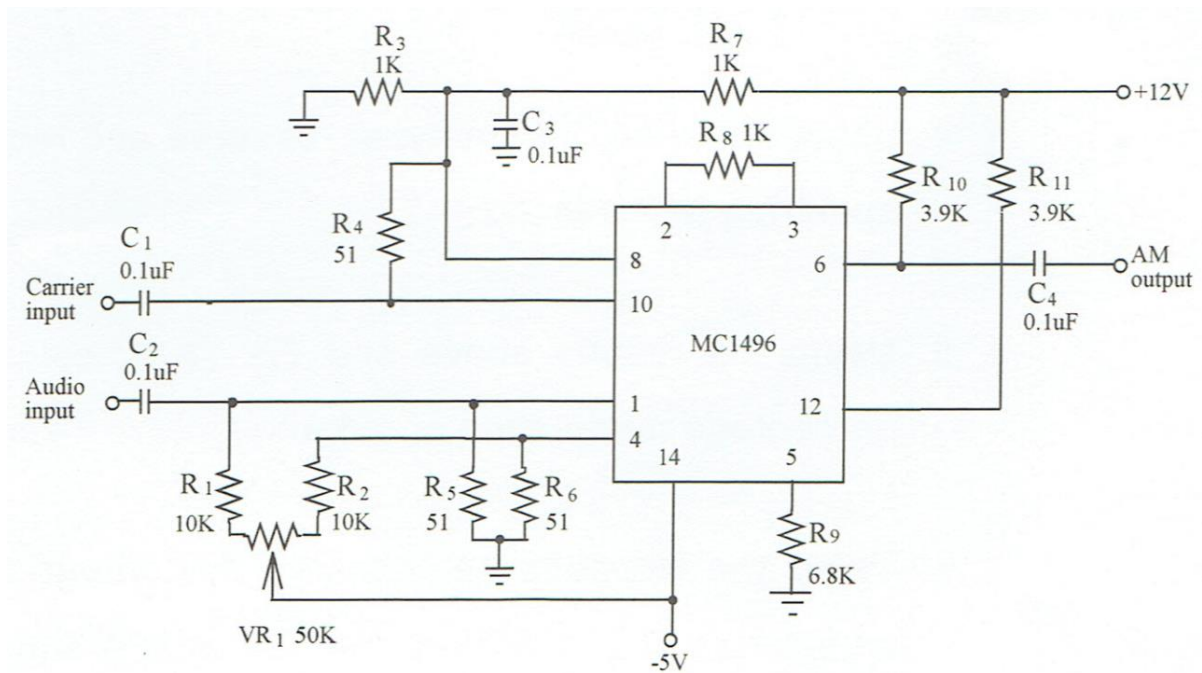
$$m = \frac{A_m}{A_{DC}} \times 100\% \quad (2.2)$$

Il est difficile de mesurer la valeur de  $A_{DC}$  dans un circuit en pratique. Par conséquent l'indice de modulation est généralement donné par la formule suivante :

$$m = \frac{E_{\max} - E_{\min}}{E_{\max} + E_{\min}} \times 100\% \quad (2.3)$$

Où  $E_{\max} = A_p + A_m$  et  $E_{\min} = A_p - A_m$ .

Il est évident à partir des équations que plus l'indice de modulation est grand, plus les signaux de bandes latérales est mieux et plus la transmission est efficace. En pratique, l'indice de modulation est le plus souvent inférieur ou égale à 1 ; pour  $m > 1$ , on parle d'une sur-modulation. Le circuit de modulation est montré sur la **Figure. 1**.



**Figure. 1.** Modulateur AM à base du circuit MC 1496

### III.2. Démodulation d'amplitude

La démodulation est l'opération inverse de la modulation. Elle consiste à récupérer le signal utile ou modulant à partir du signal AM ou modulé. Cette opération est parfois appelée aussi détection. Généralement, on distingue deux types de détecteur, synchrone et asynchrone, on s'intéresse dans le cadre de ce TP au deux types de détecteur.



### III.2.1. Détecteur synchrone (détection de produit)

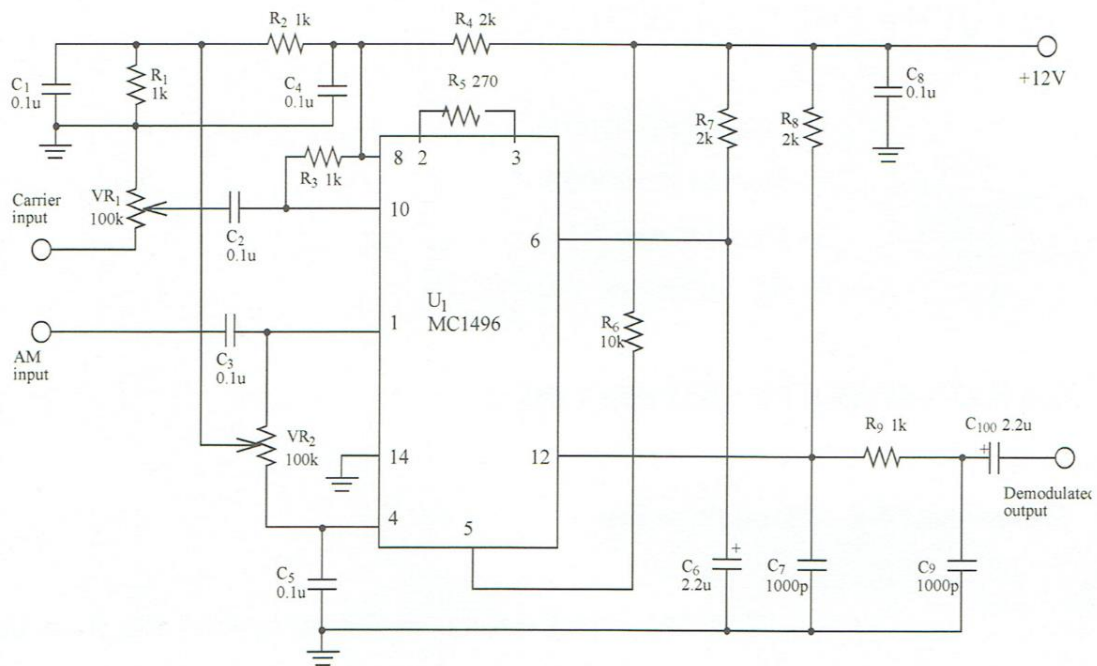
L'entrée du détecteur synchrone, appelé aussi détecteur de produit, est alimentée par deux signaux ; le signal AM et la porteuse. La première opération à réaliser est le produit des deux signaux, on aura donc :

$$\begin{aligned}
 x_{out}(t) &= kx_c(t) \times x_{AM}(t) & (2.4) \\
 &= kV_{DC}V_c^2 [1 + m \cos(2\pi f_m t)] \cos^2(2\pi f_c t) \\
 &= \frac{kV_{DC}V_c^2}{2} + \frac{kV_{DC}V_c^2}{2} m \cos(2\pi f_m t) + \frac{kV_{DC}V_c^2}{2} [1 + m \cos(2\pi f_m t)] \\
 &\quad \cos(4\pi f_c t)
 \end{aligned}$$

Où  $k$  est le gain du modulateur. Un filtre passe-bas est utilisé pour enlever le troisième terme de l'équation ci-dessus, tandis que le premier terme sera bloqué par un condensateur comme le montre le montage du démodulateur ci-après. Il ne reste donc que le signal utile qui représente la sortie du démodulateur :

$$x_{out}(t) = \frac{kV_{DC}V_c^2}{2} m \cos(2\pi f_m t) \quad (2.5)$$

Le circuit de démodulation par détection synchrone est montré sur la **Figure. 2**.



**Figure. 2.** Démodulation AM par détection synchrone à base du circuit MC 1496

### III.2.2. Détecteur asynchrone (détection de diode)

Le schéma bloc d'un modulateur AM à détection asynchrone est présenté sur la **Figure. 3**. Le signal AM avec ses deux enveloppes, positive et négative, est appliqué à l'entrée du

redresseur. À la sortie du redresseur on ne trouve que l'enveloppe positive plus une composante continue qui, à leurs tours, sont nourris à un filtre passe-bas. Ce dernier est responsable à l'élimination de la porteuse, fournissant donc comme signal de sortie le signal original plus la composante continue. Finalement, le dernier bloc intervient pour éliminer la composante continue tout en gardant le signal original en tant que sortie finale du démodulateur.

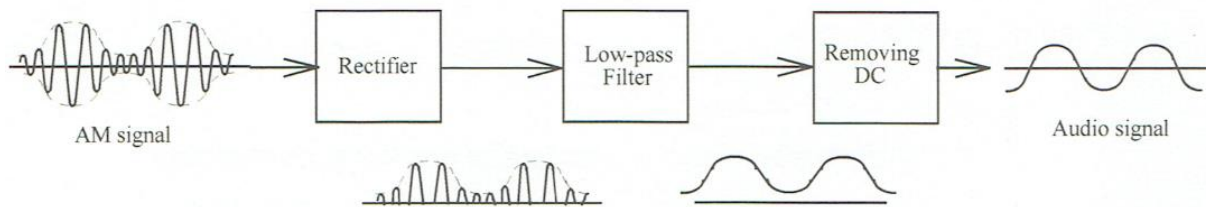


Figure. 3. Schéma bloc d'un démodulateur à redressement.

La Figure. 4 montre un circuit pratique du détecteur asynchrone. Les composantes  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$ ,  $R_4$ ,  $U_1$  et  $U_2$  constituent deux amplificateurs inverseurs mis en cascade pour offrir un gain propre au signal AM. Le signal AM amplifié est redressé par la diode  $D_1$  puis passé au filtre passe-bas constitué par les condensateurs  $C_2$  et  $C_3$  et la résistance  $R_5$ . Le signal de sortie du filtre passe-bas est l'enveloppe positive du signal AM plus une composante continue. Le condensateur  $C_4$  est utilisé pour bloquer la composante continue et ne laisse passer que le signal original.

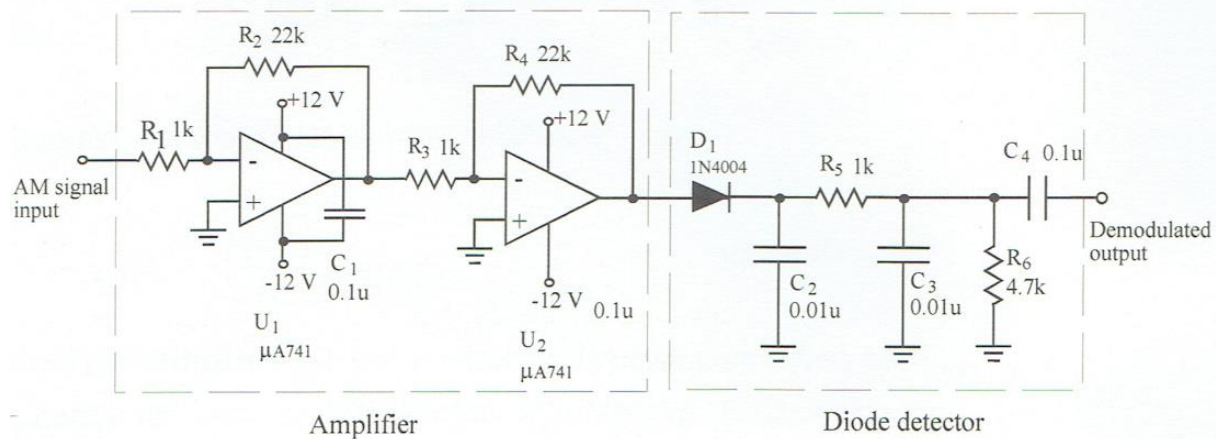


Figure. 4. Démodulation AM par détection asynchrone.

### III.3. Circuit MC1496

Le circuit MC1496 peut être utilisé comme étant un multiplicateur de fréquence, un modulateur AM, ou un modulateur à double bande latérale, une modulation AM où seules les deux bandes latérales sont transmises, tandis que la porteuse ne l'est pas.

La Figure. 5 montre la configuration interne du circuit MC1496. L'amplificateur différentiel  $Q_5Q_6$  est utilisé pour conduire les amplificateurs  $Q_1Q_2$  et  $Q_3Q_4$ . Le générateur de courant constant  $Q_7$  et  $Q_8$  fournit un courant constant à l'amplificateur différentiel  $Q_5Q_6$ . Le gain global

du MC1496 peut être contrôlé par une résistance externe montée entre les pins 2 et 3. Pour la modulation AM, le signal modulant doit être appliqué aux pins 1 et 4, et la porteuse aux pins 8 et 10. Le courant de polarisation est souvent fourni par brancher une résistance entre le pin 5 et le générateur de tension.

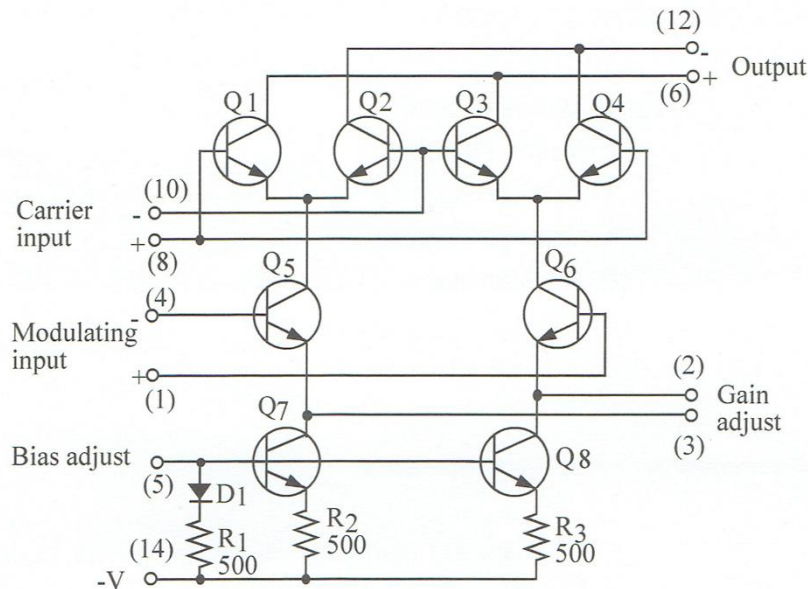


Figure. 5. Configuration interne du circuit MC 1496

#### IV. Partie pratique

##### IV.1. Manipulation 1 : Modulation d'amplitude

1. Localisez le circuit modulateur AM sur le module KL-93002. Insérez les connecteurs sur les positions J1 et J3 pour définir  $R_8 = 1 \text{ k}\Omega$  et  $R_9 = 6,8 \text{ k}\Omega$ .
2. Connectez une onde sinusoïdale (signal modulation) d'amplitude de  $250 \text{ mV}_{\text{p-p}}$  et une fréquence de  $1 \text{ kHz}$  à l'entrée audio (1/P2), et une onde sinusoïdale (porteuse) d'amplitude de  $250 \text{ mV}_{\text{p-p}}$  et une fréquence de  $100 \text{ kHz}$  à l'entrée porteuse (I/P1).
3. Connectez l'entrée verticale de l'oscilloscope à la sortie du modulateur AM (O/P). Observez la forme d'onde de sortie et ajustez la résistance variable  $VR_1$  pour avoir un indice de modulation de 50%. Enregistrez le résultat dans le **Tableau 1**.
4. À l'aide de l'analyseur de spectre, observez et enregistrez le spectre du signal de sortie dans le **Tableau 1**.
5. En utilisant les résultats ci-dessus et **Equation (3)**, calculez et enregistrez le pourcentage de modulation du signal de sortie dans le **Tableau 1**.
6. À l'aide de l'oscilloscope, observez les signaux de sortie pour les amplitudes audio de  $200 \text{ mV}_{\text{p-p}}$  et  $150 \text{ mV}_{\text{p-p}}$  et enregistrez les résultats dans le **Tableau 1**.
7. Répétez les étapes 4 et 5.

8. Connectez une onde sinusoïdale d'une amplitude de  $150 \text{ mV}_{\text{p-p}}$  et une fréquence de 1 kHz à l'entrée (1/P2) et une onde sinusoïdale de d'une amplitude de  $100 \text{ mV}_{\text{p-p}}$  et une fréquence de 100 kHz à l'entrée porteuse (1/P1).
9. À l'aide de l'oscilloscope, observez le signal AM à la borne de sortie (O/P) et enregistrez le résultat dans le **Tableau 2**.
10. À l'aide de l'analyseur de spectre, observez et enregistrez le spectre de sortie dans le **Tableau 2**.
11. En utilisant les résultats ci-dessus et **Equation (3)**, calculez le pourcentage de modulation du signal de sortie et enregistrez les résultats dans le **Tableau 2**.
12. Répétez les étapes 9 à 11 pour les amplitudes de la porteuse :  $200 \text{ mV}_{\text{p-p}}$  et  $300 \text{ mV}_{\text{p-p}}$ .
13. Connectez une onde sinusoïdale d'une amplitude de  $150 \text{ mV}_{\text{p-p}}$  et une fréquence de 3 kHz à l'entrée audio (1/P2), et une onde sinusoïdale d'une amplitude de  $250 \text{ mV}_{\text{p-p}}$  et une fréquence de 100 kHz à l'entrée porteuse (1/P1).
14. À l'aide de l'oscilloscope, observez le signal modulé à la borne de sortie (O/P) et enregistrez le résultat dans le **Tableau 3**.
15. À l'aide de l'analyseur de spectre, observez et enregistrez le spectre du signal de sortie dans le **Tableau 3**.
16. En utilisant les résultats ci-dessus et **Equation (3)**, calculez et enregistrez le pourcentage de modulation du signal de sortie dans le **Tableau 3**.
17. Répétez les étapes 14 à 16 pour les fréquences audio : 2 kHz et 1 kHz.
18. Connectez une onde sinusoïdale d'une amplitude de  $150 \text{ mV}_{\text{p-p}}$  et une fréquence de 2 kHz à l'entrée audio (1/P2) et une onde sinusoïdale d'une amplitude de  $250 \text{ mV}_{\text{p-p}}$  et une fréquence de 500 kHz à l'entrée porteuse (1/P1).
19. À l'aide de l'oscilloscope, observez le signal modulé à la borne de sortie (O/P) et enregistrez le résultat dans le **Tableau 4**.
20. À l'aide de l'analyseur de spectre, observez et enregistrez le spectre de sortie dans le **Tableau 4**.
21. En utilisant les résultats ci-dessus et **Equation (3)**, calculez et enregistrez le pourcentage de modulation du signal de sortie dans le **Tableau 4**.
22. Répétez les étapes 19 à 21 pour les fréquences de la porteuse : 1 MHz et 2 MHz.

#### IV.2. Manipulation 2 : Démodulation synchrone



1. La source du signal AM dans cette expérience provient de la sortie du modulateur AM réalisée de la *Manipulation 1*.
2. Réglez les signaux d'entrée du modulateur AM. Une porteuse sinusoïdale à une amplitude de  $250 \text{ mV}_{\text{p-p}}$  et une fréquence de 500 kHz et un signal audio sinusoïdal d'amplitude de  $150 \text{ mV}_{\text{p-p}}$  et de fréquence 3 kHz.
3. Réglez la résistance variable  $VR_1$  du modulateur AM pour obtenir un indice de modulation de 50%.
4. Connectez le signal de sortie du modulateur AM à l'entrée (I/P2) et la porteuse l'entrée (I/P1) du détecteur de produit (Product detector) de la carte KL-93002.
5. Basculez l'entrée verticale de l'oscilloscope sur le couplage DC, observez les formes d'onde de sortie de l'amplificateur et du détecteur de diode et enregistrez les résultats dans le **Tableau 5**.
6. Modifiez les fréquences audio pour avoir 2 kHz et 1 kHz et répétez l'étape 5.
7. Réglez la porteuse sur une onde sinusoïdale d'une amplitude de  $250 \text{ mV}_{\text{p-p}}$  et une fréquence de 1 MHz et le signal audio sur une onde sinusoïdale d'une amplitude de  $150 \text{ mV}_{\text{p-p}}$  et une fréquence de 2 kHz.
8. Réglez la résistance variable  $VR_1$  du modulateur AM pour obtenir un indice de modulation de 50%.
9. Réglez l'entrée verticale de l'oscilloscope sur le couplage DC, observez les formes d'onde de sortie de l'amplificateur et du détecteur de diode et enregistrez les résultats dans le **Tableau 6**.
10. Modifiez les fréquences audio pour avoir 1.5 MHz et 2 MHz et répétez l'étape 9.

#### IV.3. *Manipulation 3 : Démodulation asynchrone*

1. La source du signal AM dans cette expérience provient de la sortie du modulateur AM réalisée de la *Manipulation 1*.
2. Réglez les signaux d'entrée du modulateur AM. Une porteuse sinusoïdale à une amplitude de  $250 \text{ mV}_{\text{p-p}}$  et une fréquence de 200 kHz et un signal audio sinusoïdal d'amplitude de  $150 \text{ mV}_{\text{p-p}}$  et de fréquence 3 kHz.
3. Réglez la résistance variable  $VR_1$  du modulateur AM pour obtenir une amplitude maximale du signal AM de sortie.
4. Connectez le signal de sortie du modulateur AM à l'entrée (I/P) du détecteur à diode.

5. Basculez l'entrée verticale de l'oscilloscope sur le couplage DC, observez les formes d'onde de sortie de l'amplificateur et du détecteur de diode et enregistrez les résultats dans le **Tableau 7**.
6. Modifiez les fréquences audio pour avoir 2 kHz et 1 kHz et répétez l'étape 5.
7. Réglez la porteuse sur une onde sinusoïdale d'une amplitude de 250 mV<sub>p-p</sub> et une fréquence de 300 kHz et le signal audio sur une onde sinusoïdale d'une amplitude de 250 mV<sub>p-p</sub> et une fréquence de 3 kHz.
8. Réglez le VR<sub>1</sub> du modulateur AM pour obtenir une amplitude maximale du signal AM de sortie.
9. Réglez l'entrée verticale de l'oscilloscope sur le couplage DC, observez les formes d'onde de sortie de l'amplificateur et du détecteur de diode et enregistrez les résultats dans le **Tableau 8**.
10. Modifiez les fréquences audio pour avoir 2 kHz et 1 kHz et répétez l'étape 9.

## V. Questions et conclusions (à rendre dans un rapport)

### V.1. Modulation

- Dans la **Figure. 1**, si on change la valeur de R<sub>8</sub> de 1 kΩ à 2 kΩ, quelle variation sera observée sur le signal AM de sortie.
- Sur la même figure, si on change la valeur de la résistance R<sub>9</sub> de 6.8 kΩ à 10 kΩ, quelle variation sera observée sur le courant de polarisation du circuit MC1496.
- Déterminer le rapport de  $E_{max}$  et  $E_{min}$  si  $m = 50\%$ .
- Quelle est la fonction de VR<sub>1</sub> ?

### V.2. Démodulation

- Quelle est la fonction de R<sub>9</sub>, C<sub>7</sub> et C<sub>9</sub> dans le montage de la **Figure. 2** ?
- Quelle est la fonction de VR<sub>1</sub> et VR<sub>2</sub> dans le même montage ?
- Quelle est la fonction de R<sub>5</sub> et R<sub>6</sub> ?

**NB** : toute ressemblance dans les comptes rendu du TP conduit systématiquement à une note éliminatoire.

**Tableau. 1**

$V_c = 250 \text{ mV}_{c-c} - f_c = 100 \text{ kHz} - f_m = 1 \text{ kHz}$			
Amplitude du signal modulant	Forme d'onde du signal de sortie	Spectre du signal de sortie	Pourcentage de modulation
250 mV <sub>c-c</sub>	$E_{min} =$ $E_{max} =$		
200 mV <sub>c-c</sub>	$E_{min} =$ $E_{max} =$		
150 mV <sub>c-c</sub>	$E_{min} =$ $E_{max} =$		

**Tableau. 2**

$V_m = 150 \text{ mV}_{c-c} - f_c = 100 \text{ kHz} - f_m = 1 \text{ kHz}$			
Amplitude de la porteuse	Forme d'onde du signal de sortie	Spectre du signal de sortie	Pourcentage de modulation
100 mV <sub>c-c</sub>	$E_{min} =$ $E_{max} =$		
200 mV <sub>c-c</sub>	$E_{min} =$ $E_{max} =$		
300 mV <sub>c-c</sub>	$E_{min} =$ $E_{max} =$		

**Tableau. 3**

$V_c = 250 \text{ mV}_{c-c} - V_m = 150 \text{ mV}_{c-c} - f_c = 100 \text{ kHz}$			
Fréquence du signal modulant	Forme d'onde du signal de sortie	Spectre du signal de sortie	Pourcentage de modulation
3 kHz	$E_{min} =$ $E_{max} =$		
2 kHz	$E_{min} =$ $E_{max} =$		
1 kHz	$E_{min} =$ $E_{max} =$		

**Tableau. 4**

$V_c = 250 \text{ mV}_{c-c} - V_m = 150 \text{ mV}_{c-c} - f_m = 2 \text{ kHz}$			
Fréquence de la porteuse	Forme d'onde du signal de sortie	Spectre du signal de sortie	Pourcentage de modulation
500 kHz	$E_{min} =$ $E_{max} =$		
1 MHz	$E_{min} =$ $E_{max} =$		
2 MHz	$E_{min} =$ $E_{max} =$		

**Tableau. 5**

$V_c = 250 \text{ mV}_{c-c} - V_m = 150 \text{ mV}_{c-c} - f_c = 500 \text{ kHz} - m = 50\%$		
Fréquence du signal modulant	Forme d'onde du signal d'entrée	Forme d'onde du signal de sortie
3 kHz		
2 kHz		
1 kHz		

**Tableau. 6**

$V_c = 250 \text{ mV}_{c-c} - V_m = 150 \text{ mV}_{c-c} - f_m = 2 \text{ kHz} - m = 50\%$		
Fréquence de la porteuse	Forme d'onde du signal d'entrée	Forme d'onde du signal de sortie
1 MHz		
1.5 MHz		
2 MHz		

**Tableau. 7**

$V_c = 250 \text{ mV}_{c-c} - V_m = 150 \text{ mV}_{c-c} - f_c = 200 \text{ kHz}$		
Fréquence du signal modulant	Forme d'onde du signal d'entrée	Forme d'onde du signal de sortie
3 kHz		
2 kHz		
1 kHz		

**Tableau. 8**

$V_c = 250 \text{ mV}_{c-c} - V_m = 250 \text{ mV}_{c-c} - f_c = 300 \text{ kHz}$		
Fréquence de la porteuse	Forme d'onde du signal d'entrée	Forme d'onde du signal de sortie
3 kHz		
2 kHz		
1 kHz		





## TP 3 - Modulation / Démodulation FM

### I. Objectif du TP

- Etude du fonctionnement et des caractéristiques de la diode varicap.
- Comprendre le fonctionnement du VCO (Voltage Controlled Oscillator).
- Implémentation du démodulateur FM à base du circuit VCO.

### II. Equipements nécessaires

- Carte KL-92001.
- Carte KL-93004.
- Oscilloscope.
- Analyseur de spectre.

### III. Rappel théorique

#### III.1. Principe de la modulation de fréquence

Dans la modulation de fréquence (FM), la fréquence de la porteuse est variée en fonction de l'amplitude du signal modulant. Le signal FM peut être exprimé par les équations suivantes :

$$x_{FM}(t) = A_c \cos[\theta(t)] = A_c \cos\left[2\pi f_c t + 2\pi f_\Delta \int_t x(\lambda) d\lambda\right]$$

Si  $x(\lambda) = A_m \cos(2\pi f_m \lambda)$ , alors :

$$x_{FM}(t) = A_c \cos\left[2\pi f_c t + \frac{f_\Delta A_m}{f_m} \sin(2\pi f_m t)\right]$$
$$= A_c \cos\left[2\pi f_c t + \beta \sin(2\pi f_m t)\right]$$
(3.1)

Où :

$\theta(t)$  : fréquence instantanée du signal FM.

$f_m$  : fréquence du signal modulant

$f_c$  : fréquence de la porteuse

$\beta$  : indice de modulation

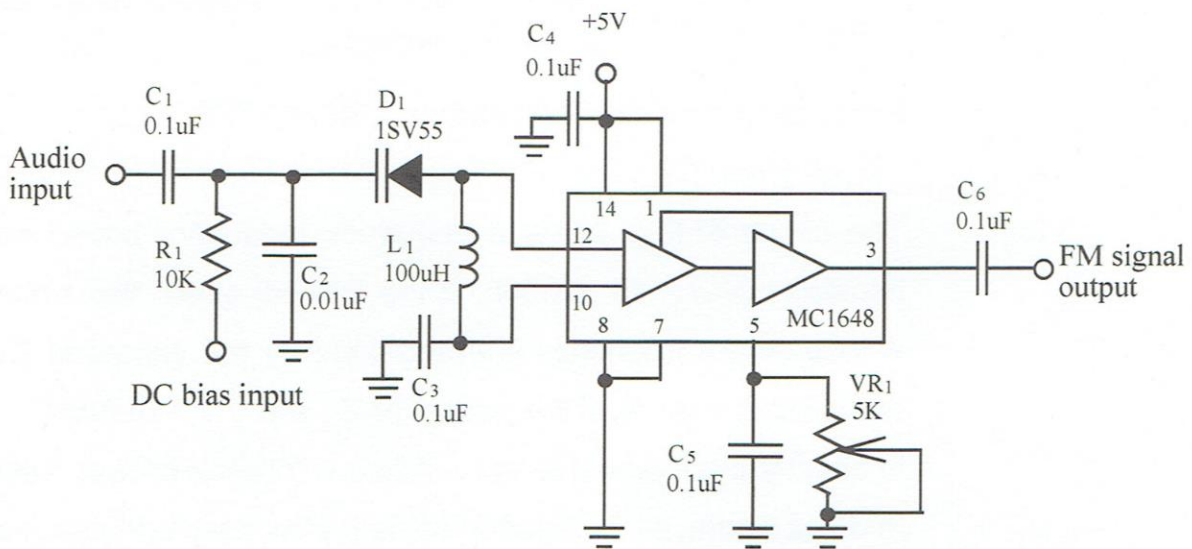
La fréquence du signal FM est exprimée comme suit :

$$\begin{aligned}
 f &= \frac{1}{2\pi} \frac{d}{dt} \theta(t) = \frac{1}{2\pi} \frac{d}{dt} [2\pi f_c t + \beta \sin(2\pi f_m t)] \\
 &= f_c - f_m \beta \cos(2\pi f_m t)
 \end{aligned}
 \tag{3.2}$$

D'après l'équation (2), on peut constater que le signal modulé en fréquence produit une déviation de fréquence par rapport à la fréquence de la porteuse lorsque l'amplitude du signal modulant est en variation.

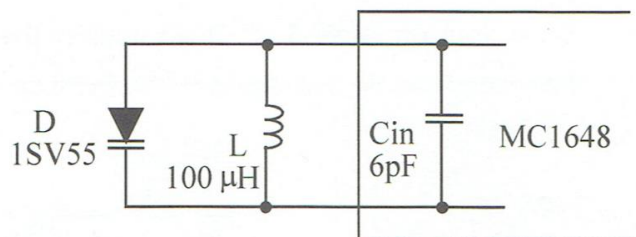
### III.2. Modulation de fréquence à base du circuit VCO MC648

Dans un premier temps, nous allons implémenter le modulateur FM à base du circuit VCO MC1648, comme le montre la **Figure 1**.



**Figure 1.** Modulateur FM à base du circuit MC1648

En principe, ce circuit est un oscillateur et l'oscillateur de réglage à son entrée détermine sa fréquence d'oscillation. Dans ce circuit, les condensateurs  $C_1$  et  $C_2$  sont utilisés pour éviter le bruit de filtrage. Dans les hautes fréquences (2.4 MHz, par exemple), la capacitance de ces deux condensateurs peut pratiquement être négligeable. Par conséquent, un circuit AC équivalent, monté sur la **Figure 2**, est un circuit LC résonant parallèle. Le condensateur peut être la diode varicap 1SV55 ( $C_d$ ) et la capacité d'entrée du circuit MC1648 ( $C_{in}$ ) connectée en parallèle.



**Figure 2.** Circuit AC équivalent en hautes fréquences

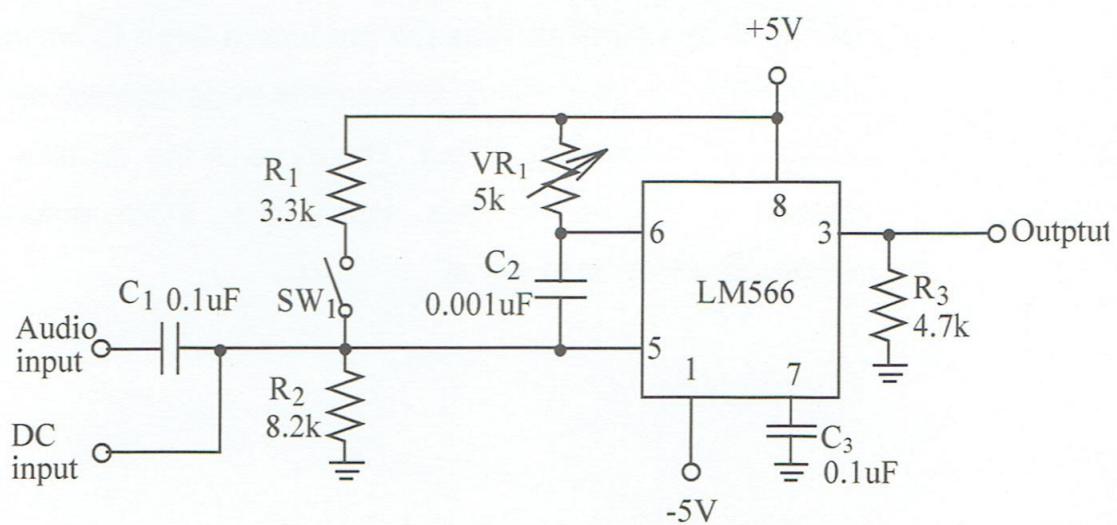
La valeur de  $C_{in}$  est approximativement 6 pF. La fréquence d'oscillation peut être calculée par la formule suivante :

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L(C_d + 6 \times 10^{-12})}}, \text{ (Hz)} \quad (3.3)$$

Comme mentionné ci-dessus, la capacité  $C_d$  de la diode varicap  $D_1$  varie en fonction de la tension inverse appliquée à ces bornes. Selon l'équation (3), il est bien clair que la variation de  $C_d$  entraîne une variation de la fréquence d'oscillation. Dans le circuit de la **Figure 1**, une petite valeur du courant DC (DC bias input) conduit à une large valeur de  $C_d$ , mais une basse fréquence de sortie. En revanche, une augmentation du courant DC résultera en une petite valeur de  $C_d$ , mais une haute fréquence de sortie. Par conséquent, si le courant DC est fixé, et un signal audio (sinusoïdal) est appliqué à l'entrée de ce circuit, le signal de sortie du VCO sera un signal modulé en fréquence.

### III.3. Modulation de fréquence à base du circuit VCO LM566

La **Figure 3** montre un modulateur de fréquence à base du circuit VCO LM566. Dans l'état ouvert du commutateur  $SW_1$ , ce circuit est un VCO typique dont la fréquence de sortie est déterminée par les valeurs de  $C_3$ ,  $VR_1$  et la tension d'entrée audio. Si les valeurs de  $C_3$  et  $VR_1$  sont fixes, la fréquence de sortie est directement proportionnelle à la différence de tension entre les broches 8 et 5, notée  $V_{(8-5)}$ . En d'autres termes, une augmentation de la tension d'entrée audio ( $V_s$ ) entraîne une diminution de la tension  $V_{(8-5)}$  et une diminution de la fréquence de sortie. Inversement, une diminution de la tension d'entrée audio ( $V_s$ ) entraînera une augmentation de la fréquence de sortie. Comme mentionné ci-dessus, les valeurs de  $C_3$  et  $VR_1$  peuvent également déterminer la fréquence de sortie d'une manière inversement proportionnelle à la valeur de leurs produit. C'est-à-dire, plus la valeur  $VR_1.C_3$  est élevée, plus la fréquence de sortie est faible.



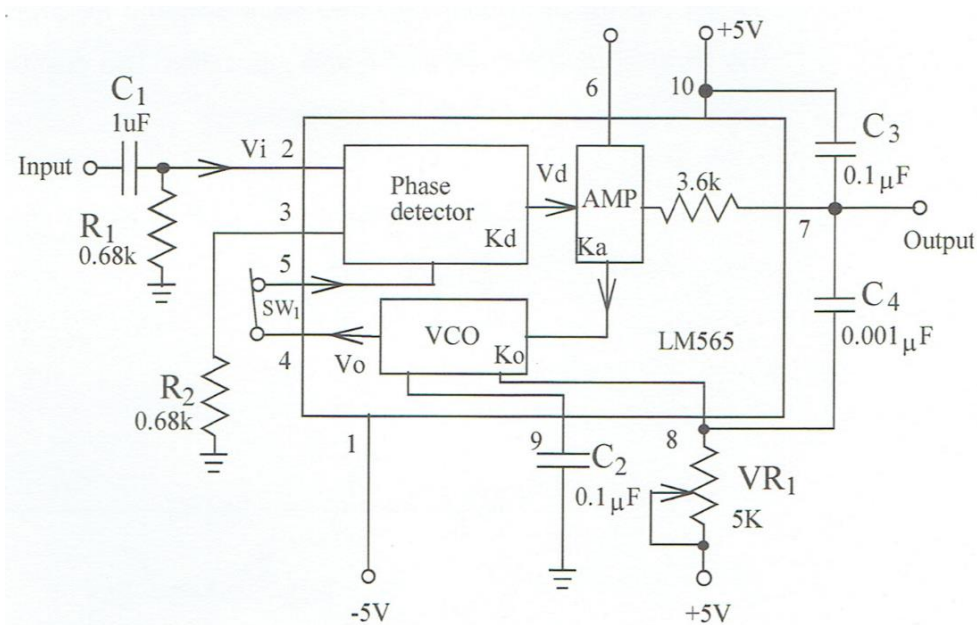
**Figure 3.** Modulateur de fréquence à base du circuit VCO LM566

Si le commutateur  $SW_1$  est fermé, le diviseur de tension formé par  $R_1$  et  $R_2$  fournit un niveau courant continu à l'entrée audio (broche 5). En ajustant la résistance variable  $VR_1$ , nous pouvons facilement régler la fréquence centrale  $f_0$  du VCO. Lorsqu'un signal audio est appliqué à l'entrée audio du circuit, la fréquence de sortie produira des déviations de fréquence autour de  $f_0$  proportionnelles aux variations de l'amplitude du signal audio. Un signal modulé en fréquence est donc obtenu.

#### III.4. Démodulation de fréquence à base du circuit PLL LM565

Le montage de la **Figure. 4** peut être utilisé pour la démodulation de fréquence. Lorsque la fréquence du signal d'entrée augmente, la tension du signal de sortie diminue, et vice versa.

Le circuit VCO du circuit LM565 est similaire à celui du circuit LM566. La fréquence centrale  $f_0$  du VCO est déterminée par les valeurs des composants extérieurs  $C_2$  et  $VR_1$ . La résistance interne de  $3.6\text{ k}\Omega$  (pin 7) et le condensateur externe  $C_3$  forment un filtre passe-bas. Le condensateur  $C_4$  branché entre les pins 7 et 8 est un condensateur à compensation de fréquence.



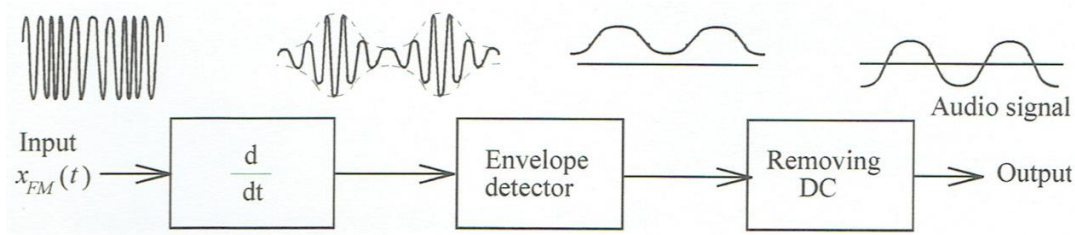
**Figure 4.** Circuit PLL LM566

#### III.5. Démodulation à base de la conversion FM-AM

La **Figure 5** montre les blocs d'un discriminateur FM-AM. Le signal FM d'entrée est premièrement converti en un signal AM en utilisant différentiateur, puis le nouvel signal AM sera démodulé par détection d'enveloppe pour récupérer le signal audio original.

Considérons que le signal FM est donné par l'équation (1), le signal de sortie du différentiateur sera comme suit :

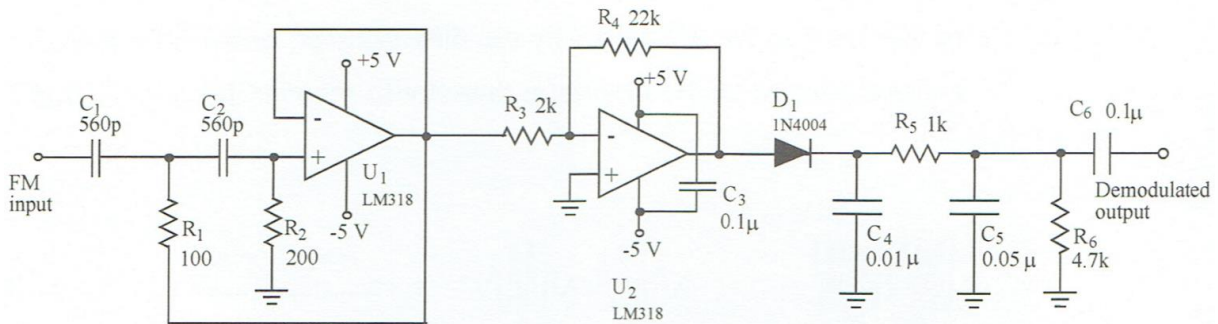
$$\begin{aligned}
 x'_{FM}(t) &= -\theta'(t) \sin[\theta(t)] \\
 &= -2\pi A_c [f_c + f_\Delta x(t)] \sin[\theta(t) + 180^\circ]
 \end{aligned}
 \tag{3.4}$$



**Figure 5.** Schéma de principe du discriminateur par conversion FM-AM

L'amplitude du signal  $x'_{FM}(t)$  varie en fonction de l'amplitude de  $x(t)$ . Le signal  $x'_{FM}(t)$  est donc un signal modulé en amplitude, à partir duquel on peut récupérer le signal audio original  $x(t)$  par détection d'enveloppe.

Le circuit de la **Figure 6** représente un démodulateur FM à base de conversion FM-AM. Les composants  $U_1$ ,  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $R_1$  et  $R_2$  constituent un différentiateur. L'amplificateur inverseur  $U_2$  d'un gain de  $-R_4/R_3$ , et le détecteur de crête AM comprenant  $D_1$ ,  $R_5$ ,  $R_6$ ,  $C_4$  et  $C_5$ . Le condensateur de couplage  $C_6$  est utilisé pour bloquer le courant continu.



**Figure 6.** Circuit discriminateur à base de conversion FM-AM.

#### IV. Partie pratique

Les manipulations de ce TP doivent être divisées en deux parties donc deux séances de TP, à cause du large temps nécessaire pour la réalisation des mesures. La première partie s'intéresse à la modulation FM par le circuit MC1648 et la démodulation de fréquence à base circuit de la conversion FM-AM. La deuxième partie utilise le circuit de modulation à base du PLL ou circuit LM566, tandis que la démodulation est réalisée à l'aide du circuit LM565, qui repose également sur le circuit PLL. Les schémas des circuits mentionnés ci-dessus sont montrés sur la carte KL-93004, Modulateur/Démodulateur FM.

##### IV.1. Partie I

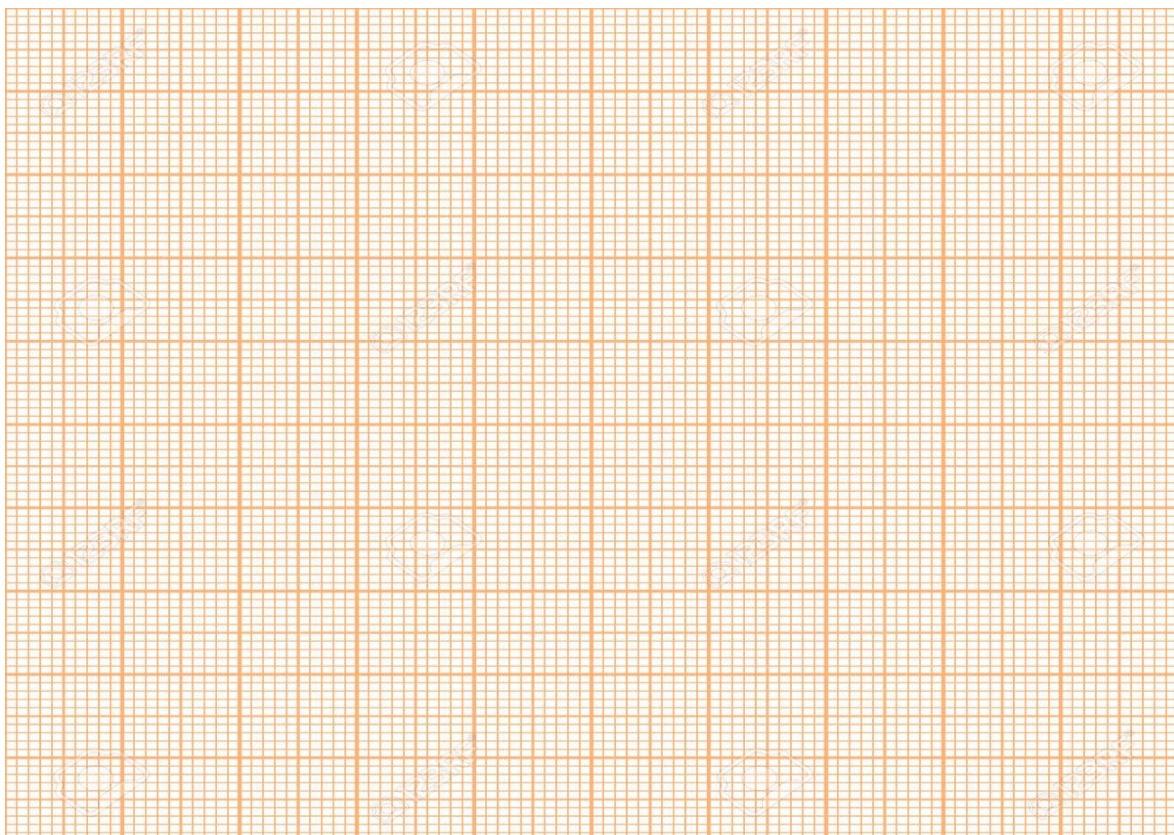
##### IV.1.1. Manipulation 1 : Mesure des caractéristiques du circuit MC1648



1. Localiser le circuit modulateur FM MC1648 sur la carte KL-93004. Insérer un connecteur dans la position J2 pour choisir  $L_1 = 100 \mu\text{H}$ .
2. Brancher une tension continue (DC) de 3V à (I/P2) et observer le signal de sortie en utilisant un oscilloscope. Ajuster  $VR_1$  jusqu'à ce qu'un signal sinusoïdal apparaisse à la sortie. Enregistrer les résultats dans le **Tableau 1**.
3. Changer la valeur de la tension continue à l'entrée du Pin 5 à 3.0 V puis une variation avec un pas de 1.0 V, jusqu'à atteindre 12.0 V. Observer les fréquences de sortie correspondants aux tensions d'entrée et enregistrer les résultats dans le **Tableau 1**.
4. Utilisant les résultats du **Tableau 1**, tracer la courbe de la fréquence de sortie en fonction de la tension d'entrée (DC bias - I/P2), sur la **Figure 7**.

**Tableau. 1**

Tension d'entrée (I/P2) (V)	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Fréquence de sortie (MHz)										



**Figure 7.** Fréquence de sortie en fonction de la tension d'entrée (DC bias) - Circuit MC 1648



#### IV.1.2. Manipulation 2 : Modulateur de fréquence à base du circuit MC 1648

1. Insérer les connecteurs dans les positions J1 afin de choisir une tension de 5V pour inverser la polarisation de la diode varicap 1SV55 et J2 pour choisir  $L_1 = 100 \mu\text{H}$ . En faisant ainsi, la fréquence de sortie sera  $f_0$ , la fréquence centrale.
2. Brancher un signal sinusoïdal d'amplitude  $2 V_{p-p}$  et de fréquence 3 kHz à l'entrée (I/P1), puis observer le signal de sortie sur l'oscilloscope. Ajuster  $VR_1$  jusqu'à ce qu'un signal sinusoïdal apparaisse à la sortie.
3. Utilisant l'analyseur de spectre, observer et enregistrer le spectre du signal de sortie dans le **Tableau 2**.
4. Répéter l'étape 3 avec les signaux de fréquences 5 kHz et 8 kHz.

**NB :** puisque la différence de fréquence entre la porteuse et le signal modulant est très large, son observation dans le domaine temporel avec un oscilloscope n'est pas évidente. Par conséquent, il est recommandé d'utiliser un analyseur de spectre.

**Tableau. 2** ( $V_m = 2 V_{C-C}$ )

Fréquence du signal modulant	Signal de sortie	Spectre du signal de sortie
3 kHz		
5 kHz		
8 kHz		

#### IV.1.3. Manipulation 3 : Démodulation de fréquence par conversion FM-AM

1. Localiser le démodulateur MC 1648 sur le module KL-93004. Insérer les connecteurs dans les positions J1 et J3 pour choisir  $L_1 = 220 \mu\text{H}$  et une tension de 5 V pour l'inversion la polarisation de la diode varicap.
2. Brancher un signal sinusoïdal d'amplitude  $2 V_{p-p}$  et de fréquence 1 kHz à l'entrée (I/P1). Tourner  $VR_1$  jusqu'à avoir une amplitude de sortie de  $600 \text{ mV}_{p-p}$ .
3. Brancher la sortie la sortie du modulateur MC 1648 à l'entrée du discriminateur FM-AM.
4. Utilisant l'oscilloscope, observer et enregistrer les signaux d'entrée et de sortie du démodulateur dans le **Tableau 3**.
5. Répéter les étapes 2 à 4 pour un signal audio de fréquences 2 kHz et 3 kHz, respectivement.

**Tableau. 3** ( $V_m = 2 V_{C-C}$ )

Fréquence du signal modulant	Signal de sortie	Spectre du signal de sortie
1 kHz		
2 kHz		
3 kHz		

## IV.2. Partie II

### IV.2.1. Manipulation 4 : Mesure des caractéristiques du circuit LM566

1. Localiser le circuit modulateur FM LM566 sur la carte KL-93004. Insérer un connecteur dans la position J2 pour choisir  $C_3 = 0.1 \mu\text{F}$ .

2. Brancher une tension continue (DC) de 3.6V à l'entrée DC du circuit LM566 au Pin 5, puis ajuster the  $VR_1$  pour obtenir une fréquence de sortie de 2 kHz. Cette fréquence est la fréquence centrale  $f_0$ .
3. Changer la valeur de la tension continue à l'entrée du Pin 5 à 2.7 V, 3.0 V, 3.3 V, 3.9 V, 4.2 V et 4.5 V. Observer les fréquences de sortie correspondants aux tensions d'entrée et enregistrer les résultats dans le **Tableau 4**.
4. En utilisant les résultats du **Tableau 4**, tracer la courbe de la fréquence de sortie en fonction de la tension d'entrée (DC bias), sur la **Figure 8**.
5. Enlever le connecteur de la position J2 et l'insérer à la position J3. Ceci change la capacité du condensateur de  $C_3 = 0.1 \mu\text{F}$  à  $C_4 = 0.01 \mu\text{F}$ .
6. Brancher une tension continue (DC) de 3.6V à l'entrée DC du circuit LM566 au Pin 5, puis ajuster the  $VR_1$  pour obtenir une fréquence de sortie de 20 kHz. Cette fréquence est la fréquence centrale  $f_0$ .
7. Changer la valeur de la tension continue à l'entrée du Pin 5 à 2.7 V, 3.0 V, 3.3 V, 3.9 V, 4.2 V et 4.5 V. Observer les fréquences de sortie correspondants aux tensions d'entrée et enregistrer les résultats dans le **Tableau 5**.
8. En utilisant les résultats du **Tableau 5**, tracer la courbe de la fréquence de sortie en fonction de la tension d'entrée (DC bias), sur la **Figure 9**.

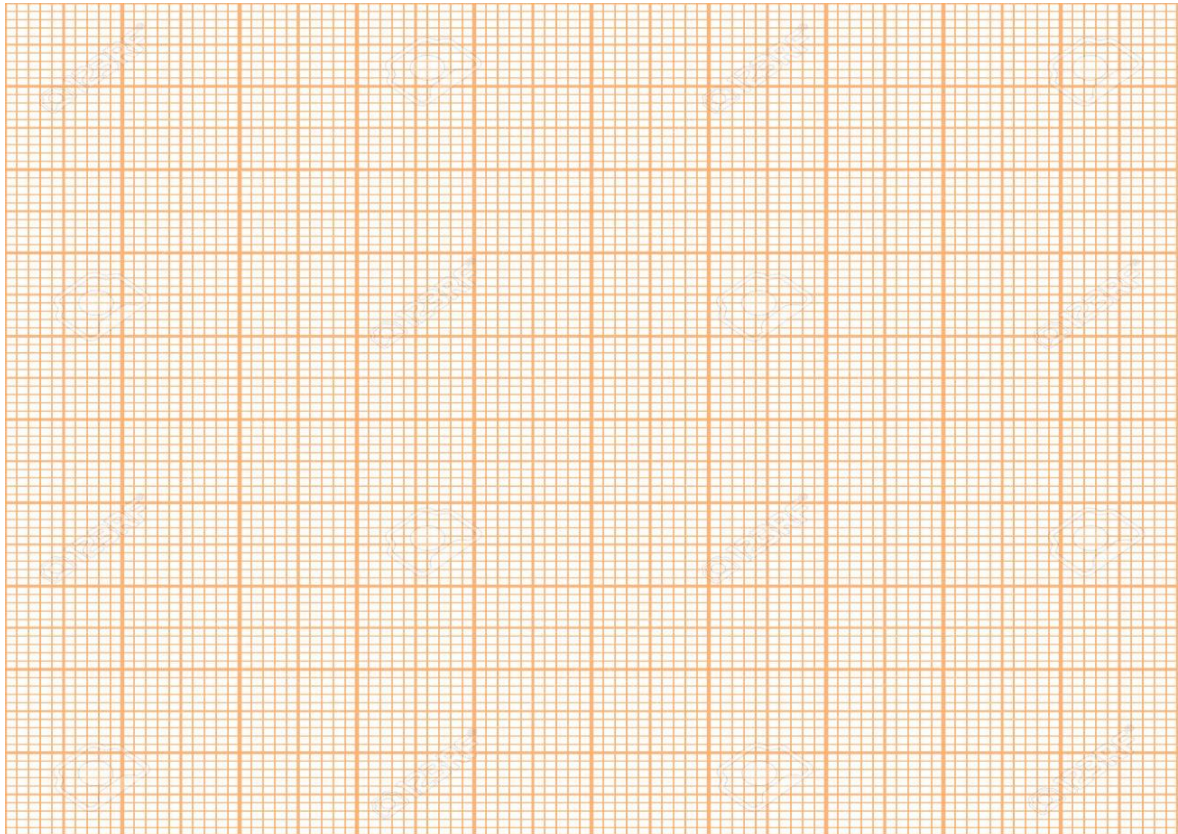
**Tableau. 4** ( $C_3 = 0.1 \mu\text{F}$ ,  $f_0 = 2 \text{ kHz}$ )

Tension d'entrée (DC bias) (V)	2.7	3.0	3.3	3.9	4.2	4.5
Fréquence de sortie (MHz)						

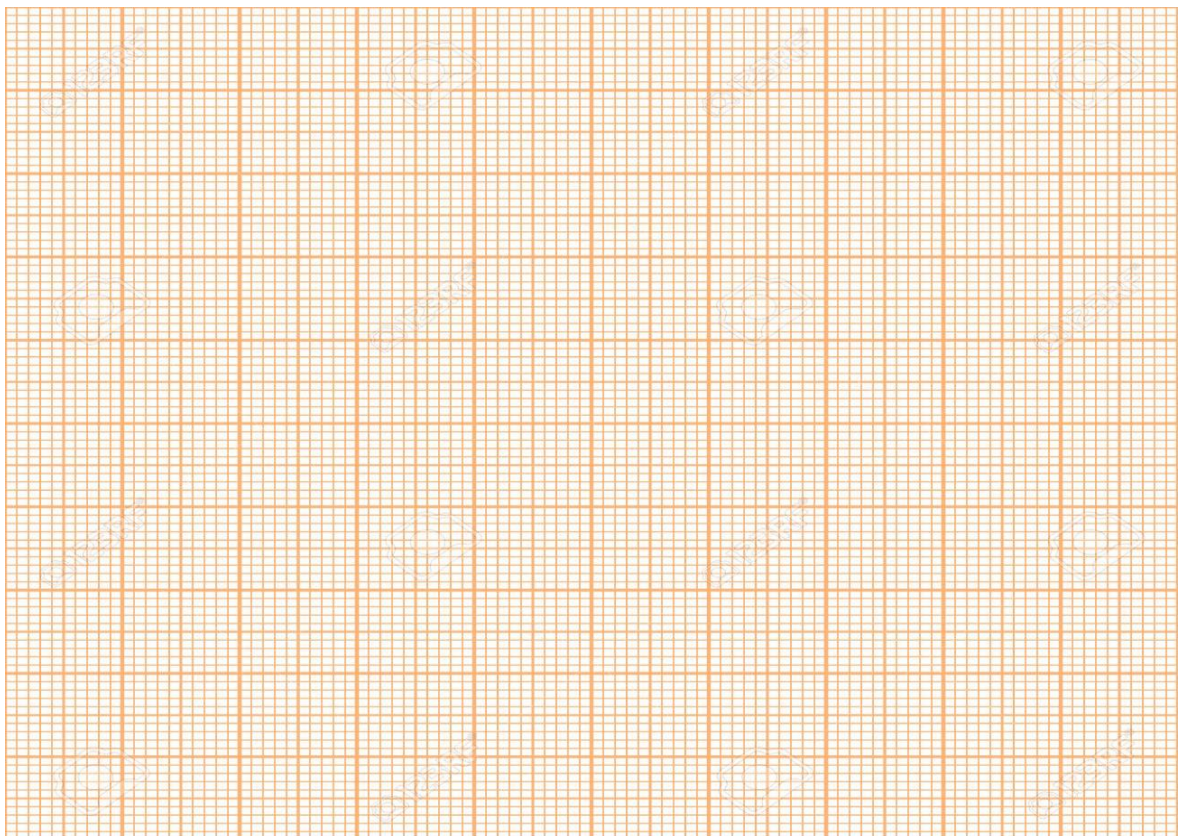
**Tableau. 5** ( $C_4 = 0.01 \mu\text{F}$ ,  $f_0 = 20 \text{ kHz}$ )

Tension d'entrée (DC bias) (V)	2.7	3.0	3.3	3.9	4.2	4.5
Fréquence de sortie (MHz)						





**Figure 8.** Fréquence de sortie en fonction de la DC bias ( $C_3 = 0.1 \mu\text{F}$ ,  $f_0 = 2 \text{ kHz}$ )



**Figure 9.** Fréquence de sortie en fonction de DC bias ( $C_4 = 0.01 \mu\text{F}$ ,  $f_0 = 20 \text{ kHz}$ )

IV.2.2. Manipulation 5 : Modulateur de fréquence à base du circuit LM566

1. Localiser le démodulateur LM566 sur le module KL-93004. Insérer les connecteurs dans les positions J1 et J3 pour choisir  $C_4 = 0.01 \mu\text{F}$ . Ajuster  $VR_1$  pour avoir une fréquence de sortie de 20 kHz.
2. Brancher un signal sinusoïdal d'amplitude  $500 \text{ mV}_{C-C}$  et de fréquence 1 kHz à l'entrée audio (I/P1). En utilisant l'oscilloscope, observer et enregistrer le signal de sortie (O/P) dans le **Tableau 6**.
3. Changer la fréquence audio à 3 kHz et 5 kHz. Observer et enregistrer les signaux de sortie correspondant dans le **Tableau 6**.
4. Changer l'amplitude du signal audio d'entrée à  $1 \text{ V}_{C-C}$ , tout en gardant sa fréquence à 1 kHz. Observer et enregistrer les signaux de sortie correspondant dans le **Tableau 7**.
5. Changer la fréquence audio à 3 kHz et 5 kHz. Observer et enregistrer les signaux de sortie correspondant dans le **Tableau 7**.

**Tableau 6.** ( $V_m = 500 \text{ mV}_{C-C}$ ,  $C_3 = 0.01 \mu\text{F}$ ,  $f_0 = 20 \text{ kHz}$ )

Fréquence du signal modulant	Signal de sortie	Spectre du signal de sortie
3 kHz		
5 kHz		
8 kHz		

**Tableau 7.** ( $V_m = 1V_{C-C}$ ,  $C_3 = 0.01 \mu F$ ,  $f_0 = 20 \text{ kHz}$ )

Fréquence du signal modulant	Signal de sortie	Spectre du signal de sortie
3 kHz		
5 kHz		
8 kHz		

IV.2.3. Manipulation 6 : Mesure des caractéristiques du circuit PLL LM565

1. Localiser le circuit PLL LM565 sur le module KL-93004. Insérer les connecteurs sur la position J2 pour choisir  $C_2 = 0.1 \mu F$ .
2. Ajuster  $VR_1$  pour obtenir les fréquences libres de sortie, maximale  $f_{oh}$  et minimale  $f_{ol}$ , au Pin 4 du circuit LM 565. Enregistrer les résultats dans le **Tableau 8**.
3. Ajuster  $VR_1$  pour obtenir une fréquence libre du VCO,  $f_0 = 2 \text{ kHz}$ .
4. Insérer le connecteur à la position J1. Brancher un signal carré d'amplitude  $0.5 V_{p-p}$  et de fréquence  $2 \text{ kHz}$  à l'entrée (I/P).
5. Observer les signaux de l'entrée du PLL (I/P) et de la sortie du VCO (O/P sur Pin 4), et augmenter lentement la fréquence d'entrée jusqu'à avoir le signal de sortie déverrouillé. Enregistrer les fréquences de sortie  $f_{LH}$  dans le **Tableau 8**.
6. Retourner la fréquence d'entrée à la fréquence libre  $f_0$  du circuit VCO. Diminuer lentement la fréquence d'entrée jusqu'à avoir le signal de sortie déverrouillé. Enregistrer les fréquences de sortie  $f_{LI}$  dans le **Tableau 8**.



7. En utilisant l'équation  $f_L = (f_{Lh} - f_{Ll}) / 2$ , calculer la plage de verrouillage.
8. Augmentez la fréquence d'entrée pour forcer le déverrouillage de la sortie VCO. Diminuez lentement la fréquence d'entrée jusqu'à ce que la PLL se verrouille. Observez la fréquence d'entrée  $f_{Ch}$  et enregistrez les résultats dans le **Tableau 8**.
9. Diminuez la fréquence d'entrée pour forcer le déverrouillage de la sortie VCO. Augmentez lentement la fréquence d'entrée jusqu'à ce que la PLL se verrouille. Observez la fréquence d'entrée  $f_{Cl}$  et enregistrez les résultats dans le **Tableau 8**.
10. En utilisant l'équation  $f_C = (f_{Ch} - f_{Cl}) / 2$ , calculer la plage de capture.
11. Enlever le connecteur J2 et lui insérer sur la position J3, pour changer  $C_2$  (0.1  $\mu$ F) à  $C_3$  (0.01  $\mu$ F). Répéter l'étape 2.
12. Ajuster  $VR_1$  pour avoir une fréquence libre du VCO égale à 20 kHz. Insérer le connecteur à la position J1, puis brancher un signal carré d'amplitude 0.5  $V_{p-p}$  et de fréquence 20 kHz. Répéter les étapes 6 à 11.

**Tableau 8.**

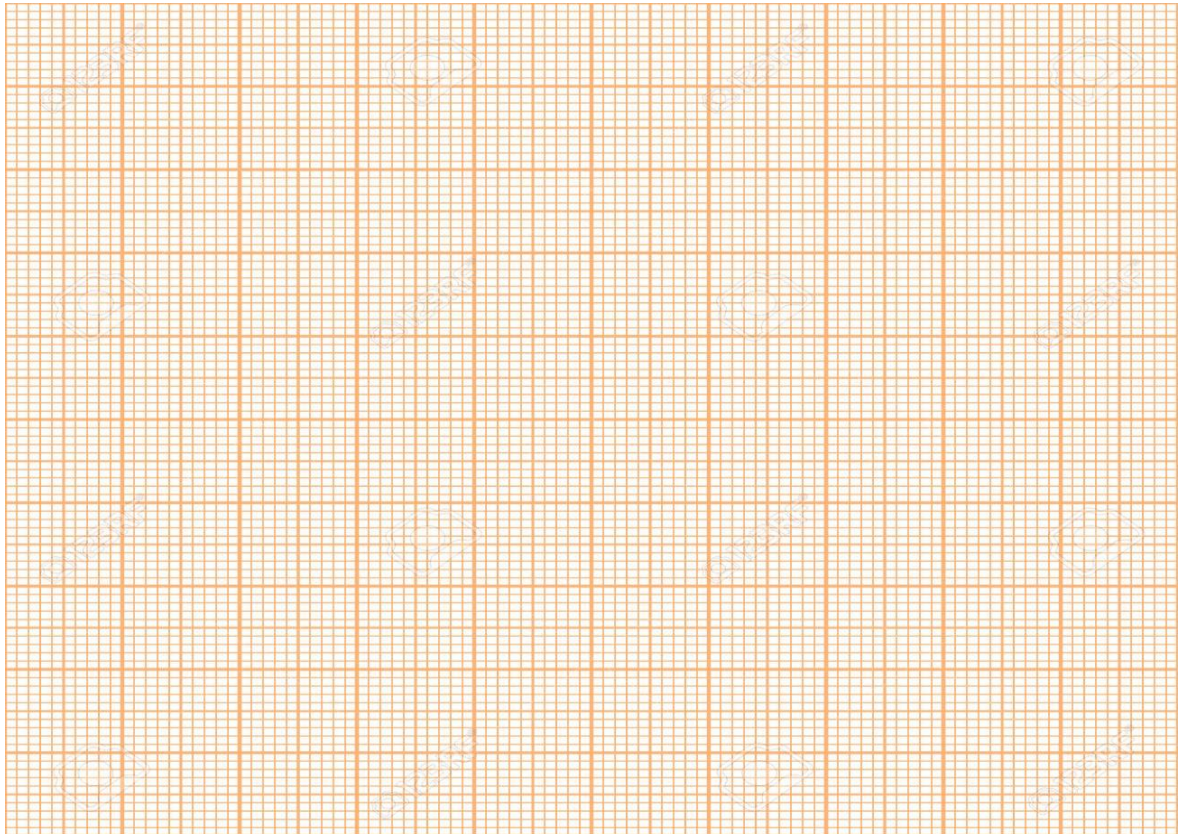
C	$f_0$	Plage de fréquences libres		Plage de verrouillage $f_L$		Plage de capture $f_C$	
		$f_{0h}$	$f_{0l}$	$f_{Lh}$	$f_{Ll}$	$f_{Ch}$	$f_{Cl}$
$C_2 = 0.1 \mu\text{F}$	2 kHz	Hz	Hz	Hz	Hz	Hz	Hz
				$f_L =$ Hz		$f_C =$ Hz	
$C_3 = 0.01 \mu\text{F}$	20 kHz	Hz	Hz	Hz	Hz	Hz	Hz
				$f_L =$ Hz		$f_C =$ Hz	

#### IV.2.4. Manipulation 7 : Mesure des caractéristiques V-F du circuit PLL LM565

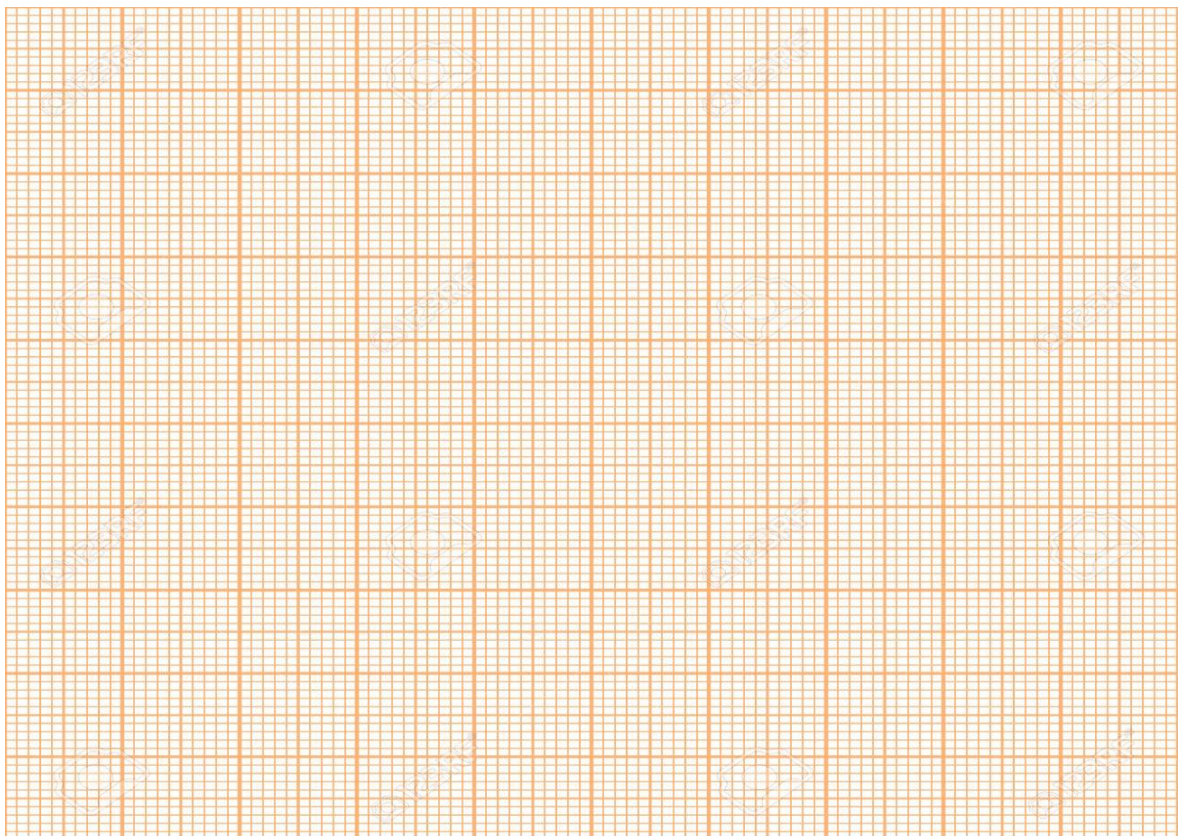
1. Localiser le circuit PLL LM565 sur le module KL-93004. Insérer les connecteurs sur la position J2 pour choisir  $C_2 = 0.1 \mu\text{F}$ .
2. Enlever le connecteur de la position J1. Ajuster  $VR_1$  pour régler une fréquence libre  $f_0$  à 2 kHz la sortie du VCO (Pin 4).
3. Insérer le connecteur à la position J1.
4. Brancher un signal carré d'amplitude  $0.5 V_{CC}$  et de fréquence 2 kHz à l'entrée audio (I/P). Mesurer et enregistrer la tension de sortie du circuit LM565 (O/P) dans le **Tableau 9**.
5. Changer la fréquence d'entrée dans la plage 0.5 kHz, 1 kHz, 1.5 kHz, 2 kHz, 2.5 kHz, 3 kHz et 3.5 kHz. Mesurer les tensions de sortie correspondant aux fréquences d'entrée. Enregistrer les résultats dans le **Tableau 9**.
6. En utilisant les résultats du **Tableau 9**, tracer la courbe de la tension de sortie en fonction de la fréquence d'entrée sur la **Figure 10**.
7. Enlever le connecteur de la position J2 et lui insérer à la position J3 pour changer  $C_2$  ( $0.1 \mu\text{F}$ ) à  $C_5$  ( $0.01 \mu\text{F}$ ).
8. Enlever le connecteur de la position J1. Ajuster  $VR_1$  pour avoir une fréquence libre  $f_0$  de 20 kHz à la sortie du VCO (Pin 4).
9. Réinsérer le connecteur à la position J1.
10. Brancher un signal carré d'amplitude  $0.5 V_{CC}$  et de fréquence 20 kHz à l'entrée audio (I/P). Mesurer et enregistrer la tension de sortie du circuit LM565 (O/P) dans le **Tableau 10**.
11. Changer la fréquence d'entrée dans la plage 16.5 kHz, 17.5 kHz, 18.5 kHz, 21.5 kHz, 22.5 kHz et 23.5 kHz. Mesurer les tensions de sortie correspondant aux fréquences d'entrée. Enregistrer les résultats dans le **Tableau 10**.
12. En utilisant les résultats du **Tableau 10**, tracer la courbe de la tension de sortie en fonction de la fréquence d'entrée sur la **Figure 11**.

**Tableau 9.** ( $V_m = 0.5 V_{CC}$ ,  $C_2 = 0.1 \mu\text{F}$ ,  $f_0 = 2 \text{ kHz}$ )

Fréquence d'entrée (kHz)	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5
Tension de sortie (V)							



**Figure 10.** Tension de sortie vs. Fréquence d'entrée ( $V_m = 0.5 V_{C-C}$ ,  $C_2 = 0.1 \mu F$ ,  $f_0 = 2 \text{ kHz}$ )



**Figure 11.** Tension de sortie vs. Fréquence d'entrée ( $V_m = 0.5 V_{C-C}$ ,  $C_5 = 0.01 \mu F$ ,  $f_0 = 20 \text{ kHz}$ )



**Tableau 10.** ( $V_m = 0.5 V_{C-C}$ ,  $C_5 = 0.01 \mu F$ ,  $f_0 = 20 \text{ kHz}$ )

Fréquence d'entrée (kHz)	16.5	17.5	18.5	20	21.5	22.5	23.5
Tension de sortie (V)							

IV.2.5. Manipulation 8 : Démodulation de fréquence à base circuit PLL (circuit LM565)

1. Localiser le circuit PLL LM566 sur le module KL-93004. Insérer les connecteurs sur la position J1 et J3 pour choisir  $C_4$  ( $0.01 \mu F$ ). Ajuster  $VR_1$  pour régler une fréquence libre de sortie,  $f_0$  à 20 kHz.
2. Compléter le circuit PLL LM565 en insérant le connecteur à la position J3 pour choisir  $C_5$  ( $0.01 \mu F$ ). Ajuster  $VR_1$  pour régler une fréquence libre  $f_0$  à 20 kHz, à la sortie du VCO (Pin 4).
3. Brancher la sortie du modulateur FM à base du circuit LM566 à l'entrée du circuit PLL LM565, puis insérer le connecteur à la position J1.
4. Brancher un signal sinusoïdal d'amplitude  $300 \text{ mV}_{p-p}$  et de fréquence 1 kHz à l'entrée du modulateur FM, LM566. En utilisant l'oscilloscope, Observer et enregistrer signal de sortie du circuit LM565 dans le **Tableau 11**.
5. Répéter les étapes 2 à 4 pour une fréquence audio de 2 kHz puis de 3 kHz.

**Tableau. 11**

Fréquence du signal d'entrée	Signal d'entrée	Signal de sortie
1 kHz		
2 kHz		

3 kHz		
-------	--	--

## V. Questions et conclusions (à rendre dans un rapport)

### V.1. Modulation

- Si la valeur de l'inductance dans la **Figure 1** est de égale à 80 nH et on souhaite avoir une fréquence de résonance de 100 MHz, quelle capacitance doit avoir la diode varicap ?
- Examinant la courbe de la **Figure 7** (fréquence en fonction de la tension), quelle partie de la courbe est souhaitable pour implémenter un modulateur de fréquence ?
- Dans le circuit de la **Figure 3**, quelle est le rôle de  $R_1$  et  $R_2$  lorsque l'interrupteur  $SW_1$  est fermée ?

### V.2. Démodulation

- En examinant les résultats de la manipulation 6, Est-il possible de montrer que la fréquence du VCO existerait lorsque les fréquences à l'entrée du circuit LM565 se trouvent en dehors de sa plage de verrouillage ?
- Comparer la plage de verrouillage mesuré avec celle du circuit PLL LM565, commenter.
- Quelle est la fonction du condensateur  $C_3$  dans le circuit de la **Figure 4**. Si on remplace la valeur de ce condensateur  $C_3$  de 0.1  $\mu\text{F}$  à 0.01  $\mu\text{F}$ , quel changement peut-on observer sur le signal de sortie du circuit LM565 (Pin 7).
- Si un filtre passe-bas est ajouté à l'entrée du démodulateur à base du circuit LM565, y a-t-il une possibilité que le signal démodulé devient plus doux ? Proposer une implémentation de ce filtre.
- Implémenter un doubleur de fréquence à base circuit PLL et des circuits logiques.

**NB** : toute ressemblance dans les comptes rendu du TP conduit systématiquement à une note éliminatoire.



## TP 4 - Synthétiseur de fréquence à base du circuit PLL

### I. Objectif du TP :

- Etude du principe du synthétiseur de fréquence.
- Mesure des caractéristiques du synthétiseur de fréquence.

### II. Equipements nécessaires :

- Carte KL-92001.
- Carte KL-93005.
- Oscilloscope.

### III. Rappel théorique

#### III.1. Synthétiseur de fréquence typique

Fondamentalement, un synthétiseur de fréquence est une source de fréquence dont la fréquence du signal de sortie est égale à la fréquence de référence d'entrée multipliée par un nombre entier. La **Figure 1** montre un synthétiseur de fréquence typique constitué d'une boucle à verrouillage de phase (PLL : Phase Locked Loop), d'un oscillateur asservi en tension (VCO : Voltage Controlled Oscillator), d'un détecteur de phase et d'un compteur diviseur-par-N.

Le détecteur de phase dans la PLL de la **Figure 1** produit une valeur de tension moyenne, qui est proportionnelle à la différence entre la fréquence de référence  $f_{REF}$  et la fréquence de sortie du compteur diviseur-par-N,  $f_O/N$ . Le compteur diviseur-par-N est généralement prédéfini par des commutateurs à molette ou contrôlé par un logiciel MPU. Ce compteur produit une impulsion de sortie toutes les N impulsions d'entrée. La tension de sortie du détecteur de phase est appliquée à l'entrée du VCO après filtrage par un filtre passe-bas (LPF) afin de contrôler la fréquence de sortie du VCO,  $f_O$ , de sorte que la fréquence de sortie soit égale à N fois la fréquence de référence en verrouillage.

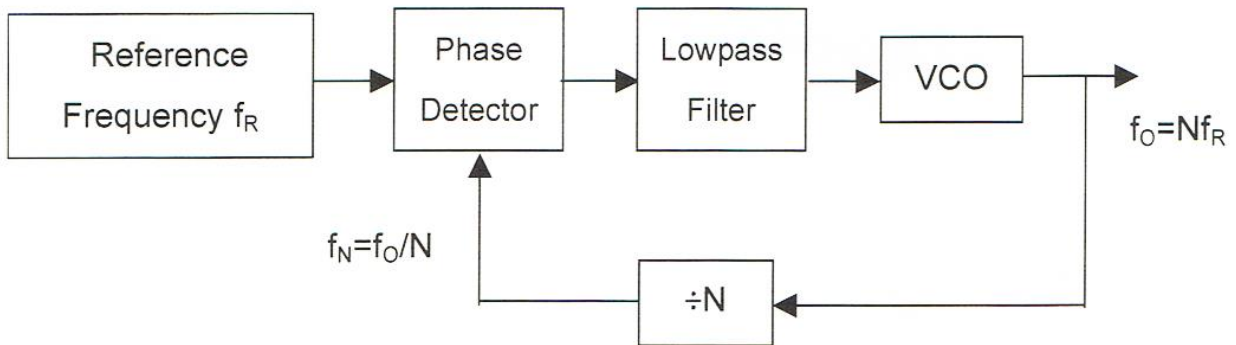
Lorsque la PLL est verrouillée, la relation entre la fréquence de référence et celle de la sortie du compteur peut être exprimée par :

$$f_R = f_N = f_O / N \quad (4.1)$$

Où par une équation équivalente :



$$f_o = Nf_R \quad (4.2)$$



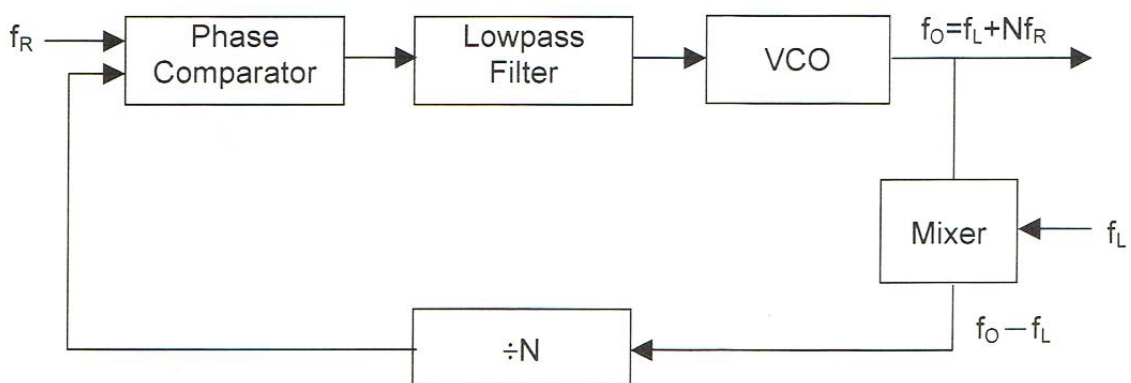
**Figure 1.** Diagramme d'un synthétiseur de fréquence typique

Il est évident que la fréquence de sortie est déterminée par la fréquence de référence  $f_R$  et la valeur prédéfinie du compteur,  $N$ . En d'autres termes, un synthétiseur de fréquence est un générateur de fréquence dont la fréquence de sortie est égale à la fréquence de référence multipliée par un entier  $N$ . Une fréquence de référence stable et précise est nécessaire pour obtenir un excellent synthétiseur de fréquence. On utilise généralement un oscillateur à cristal.

### III.2. Synthétiseur de fréquence avec convertisseur de fréquence

Généralement, il existe deux types de convertisseur de fréquence utilisés pour les synthétiseurs de fréquence. Les convertisseurs ascendants et les convertisseurs descendants.

La **Figure 2** montre un synthétiseur de fréquence à base du convertisseur descendant. Le mélangeur est à l'intérieur du circuit PLL de sorte que la déviation de fréquence de l'oscillateur local peut être corrigée par la PLL. La fréquence de sortie,  $f_o = f_L + Nf_R$ , provient directement du VCO de sorte que le VCO doit fonctionner en hautes fréquences.



**Figure 2.** Synthétiseur de fréquence à base du convertisseur descendant.

## IV. Partie pratique

### IV.1. Manipulation 1 : Synthétiseur de fréquence typique

1. Pour construire un synthétiseur de fréquence typique, les sections de circuit suivantes sont nécessaires.

- (1) Section de fréquence de référence (Reference Frequency).
- (2) Section PLL (Phase Locked Loop).
- (3) Section Diviseur-par-N ( $\div N$  Device).

Localisez ces sections sur le module synthétiseur de fréquence PLL.

2. Mesure de la fréquence de référence.

- (1) Placer le connecteur en position 2.
- (2) En utilisant l'oscilloscope, mesurer et enregistrer les signaux et fréquences sur les points de test du **Tableau 1**.

3. Mesure de la tension d'entrée du VCO en fonction de la fréquence caractéristique de sortie.

- (1) Enlever le connecteur de la position 2. Hors tension, mettre VR1 à 10 K $\Omega$  et VR2 à 1.4 M $\Omega$ , en utilisant un DMM.
- (2) Placer les connecteurs sur les positions 3 et 6. Brancher le canal 1 de l'oscilloscope à VCO OUT. Brancher un courant continu (0-15 V) à partir de KL-92001 à TP6 (VCO IN). Mesurer et enregistrer les signaux et les fréquences pour différentes tensions apparaissant sur le **Tableau 2**.
- (3) Tracer la courbe Tension-Fréquence selon les résultats du **Tableau 2**.
- (4) Placer le connecteur sur la position 7 (VR2 branché), et refaire les étapes 2 et 3. Enregistrer les résultats dans le **Tableau 3**.

4. Mesure des fréquences des signaux du comparateur de phase.

- (1) Placer les connecteurs sur les positions 2, 3, 6, 7 et 11.
- (2) Mesurer et enregistrer les fréquences sur TP4, TP8 et OUT plus différent BCD sur le **Tableau 4**.
- (3) Déplacer le connecteur de la position 3 à la position 4, et répète l'étape 2.
- (4) Déplacer le connecteur de la position 4 à la position 5, et répète l'étape 2.

5. Mesure du diviseur programmable

- (1) Placer les connecteurs sur les positions 2, 3, 6, 7 et 11.
- (2) Mesurer et enregistrer les fréquences sur U10-pin4 (fin), TP7 (fout) et TP8 pour différent BCD sur le **Tableau 5**.
- (3) Déplacer le connecteur de la position 3 à la position 4, et répète l'étape 2.
- (4) Déplacer le connecteur de la position 4 à la position 5, et répète l'étape 2.

**Tableau 1.** Mesure de la fréquence de référence

Point de test	Fréquence	Forme d'onde (signal)
TP2		
TP1		
U2-pin12		
U1-pin12		
TP4		

**Tableau 2.** Mesure de la tension d'entrée du VCO en fonction de la fréquence caractéristique de sortie.

TP6 Entrée courant continu (V)	OUT Signal de sortie et fréquence (KHz)
0	
1	
2	
3	
4	
5	
6	
7	
8	
9	

10	
----	--

**Tableau 3.** Mesure de la tension d'entrée du VCO en fonction de la fréquence caractéristique de sortie (VR2 connecté).

TP6 Entrée courant continu (V)	OUT Signal de sortie et fréquence (KHz)
0	
1	
2	
3	
4	
5	
6	
7	
8	
9	
10	

**Tableau 4.** Mesure des fréquences des signaux du comparateur de phase.

Position du connecteur	Valeur BCD	Fréquence sur TP4	Fréquence en TP8	Fréquence en OUT
3	001			
	005			
	015			

	025			
	035			
	045			
	055			
	065			
<b>4</b>	075			
	085			
	095			
	100			
<b>5</b>	200			
	300			
	400			
	500			
	600			
	700			
	800			
	900			
	999			

**Tableau 5.** Mesure  $f_{in}/f_{out}$

<b>Position du connecteur</b>	<b>Valeur BCD</b>	<b>Fréquence sur U10-pin4 (<math>f_{in}</math>)</b>	<b>Fréquence en TP7 (<math>f_{out}</math>)</b>	<b>Fréquence calculée (<math>f_{in}/f_{out}</math>)</b>	<b>Fréquence en TP8</b>

3	001				
	005				
	015				
	025				
	035				
	045				
	055				
	065				
4	075				
	085				
	095				
	100				
5	200				
	300				
	400				
	500				
	600				
	700				
	800				

#### IV.2. Manipulation 2 : Synthétiseur de fréquence avec un convertisseur de fréquence

1. Placer les connecteurs sur les positions 2, 5, 6, 7, 10 et 13. Cette étape permet de construire un synthétiseur de fréquence à base d'un convertisseur descendant, comme illustré à la **Figure 2**, et d'établir  $f_R = 0.5 \text{ KHz}$ ,  $f_L = 1 \text{ MHz}$ .



2. En utilisant l'oscilloscope, mesurer et enregistrer la fréquence de sortie de l'oscillateur local sur TP9.

Fréquence mesurée,  $f_L =$

3. Mesurer et enregistrer les fréquences sur OUT ( $f_O$ ) et U11 - Pin 5 pour différents réglages BCD des mollettes, puis mettre les valeurs mesurées de le **Tableau 6**.
4. La fréquence sur U11 - Pin 5 doit être égale à la fréquence OUT ( $f_O$ ) moins la fréquence locale  $f_L$ , ( $f_O - f_L$ ).

**Tableau 6.**

Valeur de réglage	Fréquence OUT	Fréquence en U11 - Pin 5
300		
301		
302		
303		
304		
305		
306		
307		
308		
309		
310		
311		
312		
313		

## V. Questions et conclusions (à rendre dans un rapport)

- Décrire la fonction du JK flip-flop (U5a, U5b) dans les parties 'reference frequency' et la section du diviseur programmable ( $\div N$  Device).
- Décrivez la nécessité des signaux d'entrée pour les comparateurs de phase dans le CD4046.
- Quelle est la gamme de fréquences de VCO dans la section PLL ?

**NB :** toute ressemblance dans les comptes rendu du TP conduit systématiquement à une note éliminatoire.

## **Bibliographie :**

- [1] **A. P. Malvino** ; Principes d'électronique ; 6 édition, Sciences-Sup, Dunod.
- [2] **P. Rochette** ; Les fondamentaux en Electronique ; Technosup, Ellipses.
- [3] **J. Millman** ; Micro-électronique ; Ediscience.
- [4] **J. Encinas** ; Système à verrouillage de phase (P.L.L): réalisations et applications
- [5] **P. Brémaud** ; Signal et communications: Modulation, codage et théorie de l'information; Ellipses.
- [6] **H. H. Ouslimani, A. Ouslimani** ; Fonctions principales d'électronique ; Casteilla, 2010.
- [7] **J. M. Poitevin** ; Electronique : Fonctions principales ; Dunod, 2003.
- [8] **G. Baudoin** ; Radiocommunication ; Dunod, 2007.
- [9] **Y. Mori**, Électronique pour le traitement du signal, vol. 4 ; Lavoisier, 2006.
- [10] **F. Milsant** ; Cours d'électronique tome 4, Eyrolles, 1994.
- [11] **F. Biquard** ; Modulation d'amplitude ; Technosup, Ellipses, 1998.
- [12] **L. Vandendorpe** ; Modulations analogiques ; Université Catholique de Louvain ; Belgique.