

**République Algérienne Démocratique et Populaire**  
**Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique**  
**Université 8 Mai 1945 – Guelma**  
**Faculté des sciences et de la Technologie**  
**Département d'Electronique et Télécommunications**



**Polycopie de Travaux Pratiques**

---

## **Fonctions d'électronique**

---

Niveau:

- ✓ **3<sup>ème</sup> année Licence Electronique**
- ✓ **3<sup>ème</sup> année Licence Télécommunications**

Auteur : **Dr. KHALFALLAOUI Abderrezak**

Co-auteurs : **Dr. BENKHAOUA Larbi**

**Dr. BOUCHEMEL Amar**

Année universitaire 2019/2020

## **Préface**

Ce polycopie propose une présentation des travaux pratiques qui consistent à démontrer pratiquement les notions qui sont vues dans les cours de fonctions d'électronique et de communication analogique. Ces travaux pratiques peuvent être un supplément d'information par rapport au cours.

Les séances de travail de ce TP se déroulent au cours du premier semestre pour les étudiants de la troisième année Licence électronique et Licence télécommunications pour une séance de trois heures par semaine.

Le polycopie comprend cinq travaux pratiques. Chaque TP présentés contient un rappel théorique des notions de base et les formules nécessaire, suivi d'une partie pratique (manipulation).

L'objet de ce polycopie est de permettre, à travers un grand nombre de manipulations pratiques, de fournir un approfondissement à différentes fonctions d'électronique de base étudiées.

# Sommaire

<b>Préface</b>	<b>2</b>
<b>TP01: Filtrage analogique</b>	<b>4</b>
<b>TP02: Synthèses des filtres analogiques</b>	<b>13</b>
<b>TP03: Modulation et démodulation AM</b>	<b>23</b>
<b>TP04: Modulation et démodulation FM</b>	<b>36</b>
<b>TP05: Modulation Analogique d'Impulsion</b>	<b>46</b>
<b>Bibliographie</b>	<b>57</b>

# TP N°01 : Filtrage analogique

## 1/ Introduction

Les circuits de filtrage sont utilisés pour modifier l'amplitude des signaux électriques en fonction de leur fréquence. Ainsi les parts perturbatrices du signal dans un mélange de fréquences peuvent-elles être affaiblies, voire masquées. Pour réaliser ce type de circuit de filtrage, on se sert de quadripôles passifs. Quadripôles, car ces circuits disposent de quatre connexions électriques, dont deux constituent l'entrée et deux la sortie. Passifs, car il ne s'y produit aucune amplification active du signal.

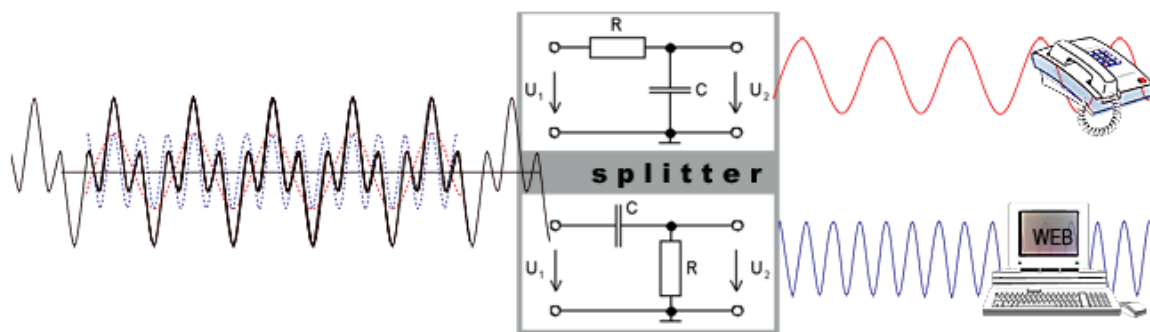


Figure 1: filtre ADSL

Le filtre ADSL est un exemple rencontré dans la télécommunication. Un passe-haut et un passe-bas séparent les signaux ADSL et RNIS.

## 2/ Objectifs TP:

- ✓ Effectuer différents types de filtrage analogique d'un signal sinusoïdal.
- ✓ Déterminer les caractéristiques principales (Fonction de transfert, fréquence de coupure, bande passante).
- ✓ Observer la réponse fréquentielle (Gain en dB et phase).

### 3/ Rappel théorique

La **fonction de Transfert** est la fonction qui décrit la manière dont se modifie l'amplitude du signal de sortie en fonction de la fréquence:  $F(j\omega)=U_2/U_1$

Le **gain** présente le module de la fonction de transfert :  $G(j\omega)=|F(j\omega)|$

Le plus souvent on représente le **gain en décibel**:  $G_{dB}=20\log|F(j\omega)|$

La **réponse de phase** décrit le décalage angulaire entre la grandeur d'entrée et la grandeur de sortie en fonction de la fréquence. le **déphasage** présente l'argument de la fonction de transfert:  $\varphi(\omega)=\arg(F(j\omega))$

la **fréquence de coupure** ou la fréquence critique est la fréquence où l'amplitude de sortie baisse à 3 dB au-dessous de l'amplitude de la bande passante. Ce qui représente 70,7% ou 0,707 ( $1/\sqrt{2}$ ) de la tension ou exactement la moitié de la puissance comparée à la bande passante.

Si l'on divise la fonction de transfert en réponse fréquentielle et de déphasage, on obtient un graphe spécial qui, de fait, est constitué de deux graphes. La représentation fréquentielle simultanée de la réponse du gain en décibel et de la réponse de phase est appelée **diagramme de Bode**, la fréquence  $\omega$  étant appliquée logarithmiquement.

La plage de fréquence dans laquelle le signal sort du filtre sans être modifié est appelée **bande passante (a)**. La plage de fréquence dans laquelle le signal est masqué est appelée **bande bloquante (b)**.

La **zone de transition** entre les bandes passante et bloquante dans laquelle se modifie le signal de sortie est décrite par la **pente de transition**. Celle-ci est exprimée en décibels (dB) par octave ou décibels (dB) par décade. Souvent, il est souhaitable d'obtenir une allure si possible raide de la fonction de transfert dans la zone de transition. Pour l'obtenir, il suffit par exemple d'augmenter l'ordre du filtre. Mais une augmentation de l'ordre du filtre entraîne aussi une augmentation du déphasage, ce qui est à éviter dans la mesure du possible. Il faut donc toujours trouver un compromis.

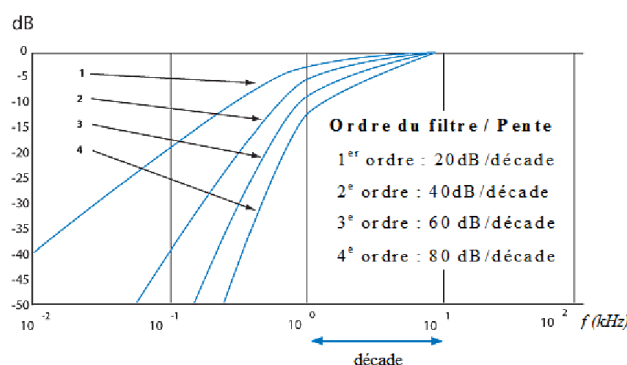


Figure 2: différentes pentes pour un filtre passe-haut

L'ordre du filtre indique la quantité de composants de base (accumulateur d'énergie, bobine ou condensateur) participent à la construction du filtre. L'indication de l'ordre reflète ainsi la complexité du filtre.

On appelle **filtre passe-bas** un filtre qui, en présence d'un signal multifréquence, laisse passer les fréquences au-dessous de la fréquence critique (faibles fréquences) pratiquement sans les atténuer, mais affaiblit en revanche la part de fréquences élevées.

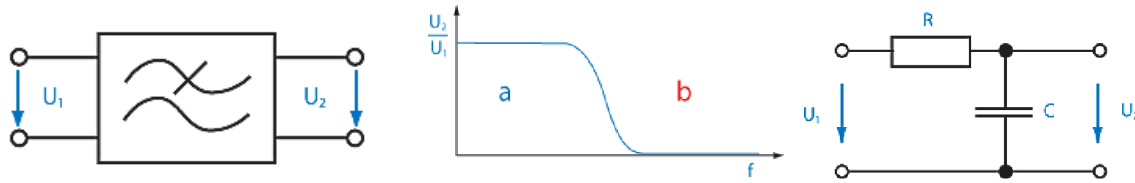


Figure 3: filtre passe-bas

D'une manière générale, un passe-bas est un quadripôle constitué, dans sa version la plus élémentaire, de la combinaison d'une résistance et d'un condensateur (organe RC). Un tel passe-bas passif du 1<sup>er</sup> ordre présente la structure dans la figure c

Contrairement au passe-bas, un **filtre passe-haut** laisse passer les fréquences élevées. La structure fondamentale de ce quadripôle est constituée d'un condensateur C et d'une résistance R.

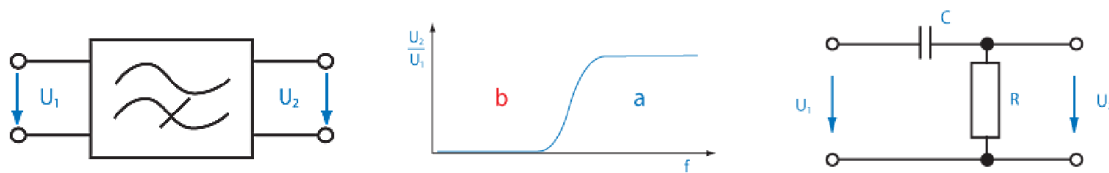


Figure 4: filtre passe-haut

Le circuit série comprenant C et R est un diviseur de tension dépendant de la fréquence

Le **filtre passe-bande** et le **filtre coupe-bande** sont des circuits de filtrage quadripolaires qui sont utilisés pour affaiblir les plages indésirées d'un mélange de fréquences. Un passe-bande filtre les fréquences d'une certaine plage de fréquence. Le passe-bande résulte de la combinaison d'un passe-haut et d'un passe-bas. Un coupe-bande a l'effet contraire d'un passe-bande.

D'une manière générale, le **filtre passe-bande** RC est un quadripôle au circuit intérieur suivant :

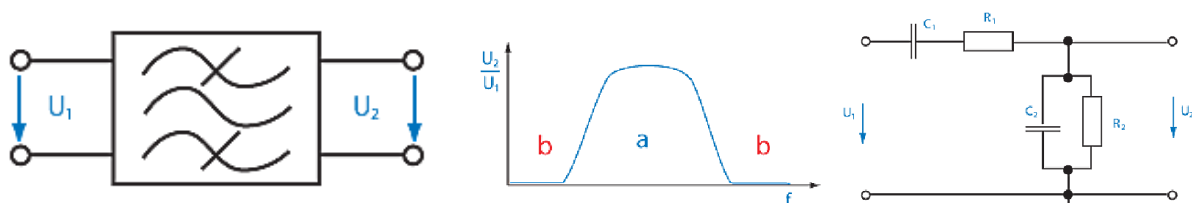


Figure 5: filtre passe-bande

Le circuit mixte, constitué du circuit série avec  $R_1$  et  $C_1$  monté en série avec le circuit parallèle avec  $C_2$  et  $R_2$ , est un diviseur de tension dépendant de la fréquence

D'une manière générale, le **filtre coupe-bande** RC est un quadripôle au circuit intérieur suivant :

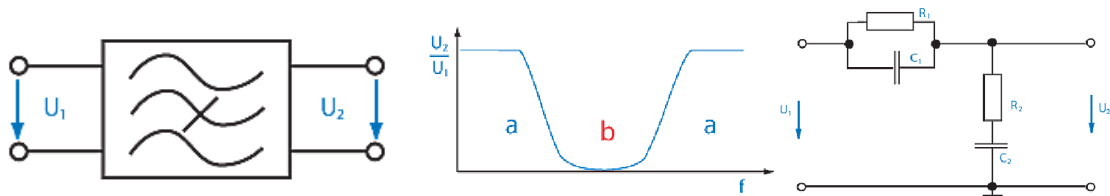
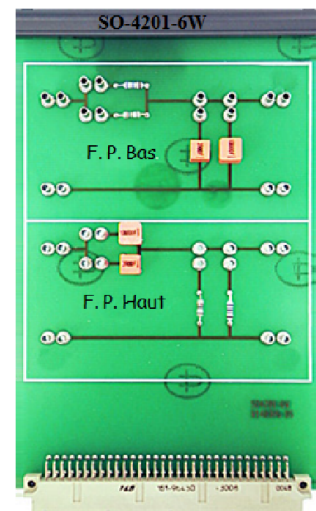


Figure 6: filtre coupe bande

#### 4/ Matériels

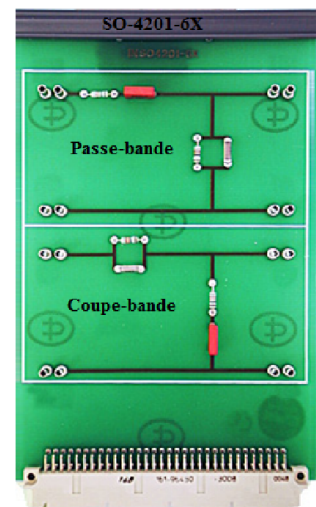
##### a/ Carte UniTrain-I « Passe- bas et passe- haut »

La carte d'essai « Passe- bas et passe- haut », SO-4201-6W, comprend dans sa partie supérieure un passe-bas RC et dans sa partie inférieure un passe-haut CR. Chaque filtre est constitué de deux résistances et de deux capacités qui peuvent être combinées de manière quelconque à l'aide de ponts. Il est possible de réaliser des filtres de différentes caractéristiques, permettant ainsi de reproduire l'influence de ces valeurs sur le comportement du filtre.



##### b/ Carte UniTrain-I « Passe-bande / Coupe-bande »

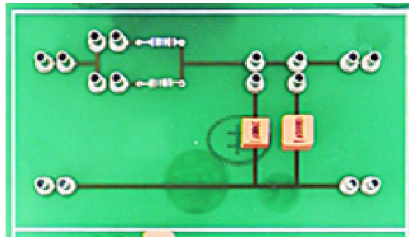
La carte d'essai « Passe-bande / Coupe-bande », SO-4201-6X, comprend dans sa partie supérieure un passe-bande RC et dans sa partie inférieure un coupe-bande RC. Chaque circuit est constitué de deux résistances et de deux condensateurs qui ne peuvent être modifiés.



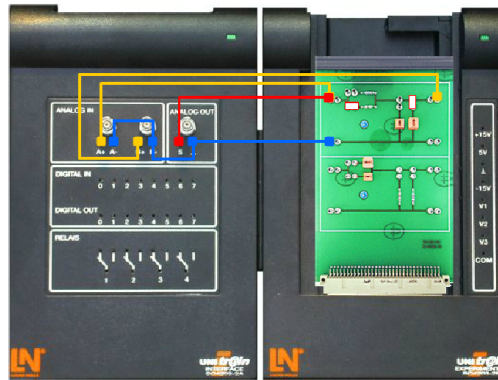
## 5/ Manipulations

### 5-1/ Etude du filtre RC:

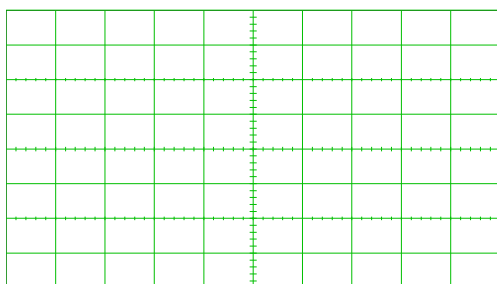
Le Circuit ci-dessous, présente un filtre passe bas du premier ordre avec deux variantes dans les valeurs de R et C.



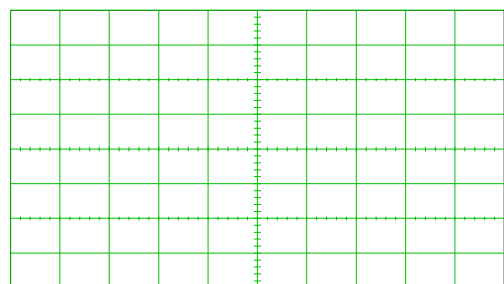
- Relever les valeurs de  $R_1$ ,  $R_2$  et  $C_1$ ,  $C_2$  sur la carte.
- Citer les différentes combinaisons possibles.
- Déterminer la fonction de transfert du montage et calculer la fréquence de coupure pour chaque combinaison.
- Câbler les différents composants afin de réaliser le montage suivant



- Appeler le générateur de fonction, faire le réglage nécessaire pour avoir un signal sinusoïdal d'amplitude 2Volt et de fréquence :
- a)  $f=100\text{Hz}$ .
- Démarrer l'oscilloscope, lancer la mesure et relever l'oscillogramme.



a)  $f=100\text{Hz}$



b)  $f=4\text{kHz}$

- Calculer le rapport  $V_s/V_e$  et le déphasage entre les deux signaux.
- b)  $f=4\text{kHz}$ .
- Démarrer l'oscilloscope, lancer la mesure et relever l'oscillogramme.
- Calculer le rapport  $V_s/V_e$  et le déphasage entre les deux signaux.
- Interpréter le résultat pour les deux fréquences
- c)  $f= [10\text{Hz}-10\text{kHz}]$

En faisant varier la fréquence de  $V_e$ , relever  $V_s$  puis remplir le tableau suivant :

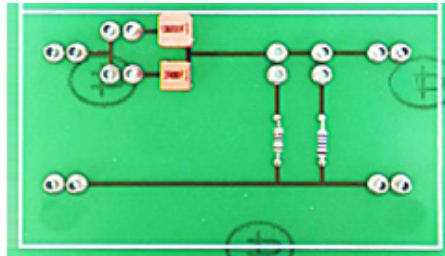


Fréquence									
$V_s$									
$V_s/V_e$									
$G(dB)$									
$\delta t$									
$\Phi(^{\circ})$									

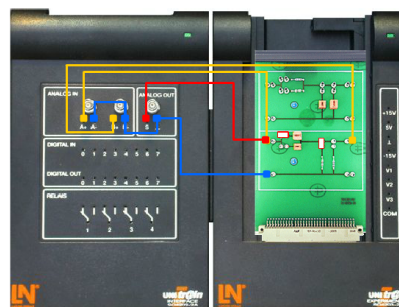
- Tracer un papier semi-logarithmique les courbes de Bode  $G(dB)$  et  $\Phi(^{\circ})$  en fonction de la fréquence). En déduire sur ces courbes la fréquence de coupure  $f_c$ . Quelle est alors la bande passante du filtre ?
- Conclure sur les valeurs, théorique et pratique de la fréquence de coupure  $f_c$ .

### 5-2/ Etude du filtre CR:

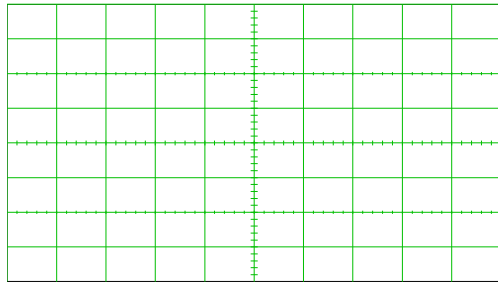
Le Circuit ci-dessous, présente un filtre passe haut du premier ordre avec deux variantes dans les valeurs de C et R.



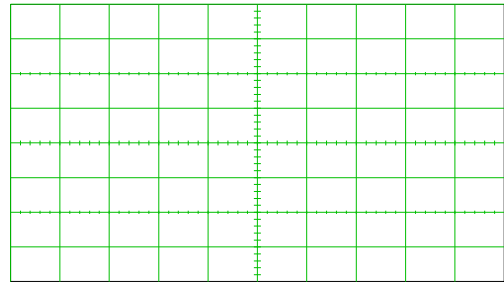
- Relever les valeurs de  $C_1$ ,  $C_2$  et  $R_1$ ,  $R_2$  et sur la carte.
- Citer les différentes combinaisons possibles.
- Déterminer la fonction de transfert du montage et calculer la fréquence de coupure pour chaque combinaison.
- Câbler les différents composants afin de réaliser le montage suivant



- Appeler le générateur de fonction, faire le réglage nécessaire pour avoir un signal sinusoïdal d'amplitude 2Volt et de fréquence :
  - $f=100kHz$ .
  - Démarrer l'oscilloscope, lancer la mesure et relever l'oscillogramme.
  - Calculer le rapport  $V_s/V_e$  et le déphasage entre les deux signaux.
- $f=300Hz$ .
- Démarrer l'oscilloscope, lancer la mesure et relever l'oscillogramme.
- Calculer le rapport  $V_s/V_e$  et le déphasage entre les deux signaux.
- Interpréter le résultat pour les deux fréquences



d)  $f=100\text{kHz}$



e)  $f=300\text{Hz}$

f)  $f= [200\text{Hz}-100\text{kHz}]$

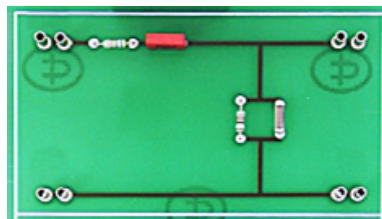
En faisant varier la fréquence de  $V_e$ , relever  $V_s$  puis remplir le tableau suivant :

Fréquence									
$V_s$									
$V_s/V_e$									
$G(\text{dB})$									
$\delta t$									
$\Phi(^{\circ})$									

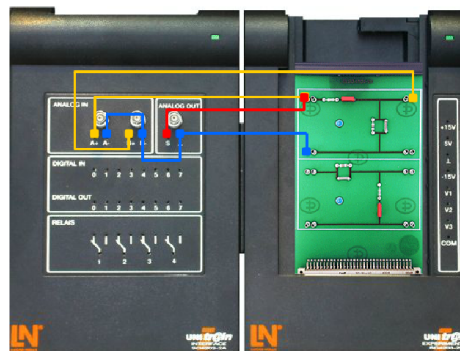
- Tracer un papier semi-logarithmique les courbes de Bode  $G(\text{dB})$  et  $\Phi(^{\circ})$  en fonction de la fréquence). En déduire sur ces courbes la fréquence de coupure  $f_c$ . Quelle est alors la bande passante du filtre ?
- Conclure sur les valeurs, théorique et pratique de la fréquence de coupure  $f_c$

### 5-3/ Etude du filtre passe bande:

Le Circuit ci-dessous, présente un filtre passe bande du deuxième ordre avec deux résistances et deux condensateurs.



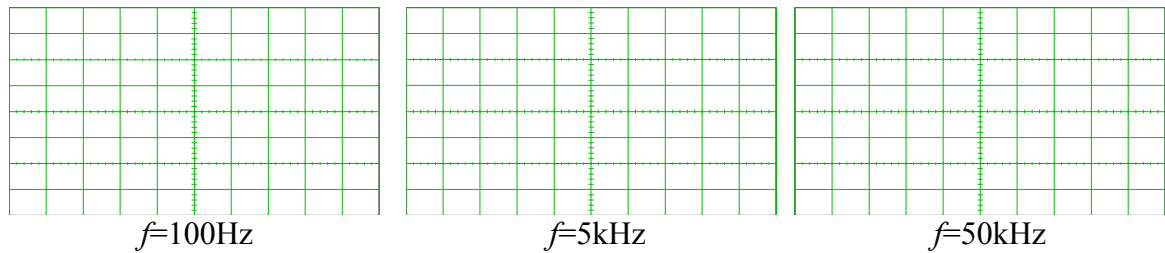
- Relever les valeurs de  $R_1$ ,  $R_2$  et  $C_1$ ,  $C_2$  sur la carte.
- Déterminer la fonction de transfert du montage et calculer la fréquence propre et les fréquences limites  $f_1$  et  $f_2$ .
- Câbler les différents composants afin de réaliser le montage suivant



- Appeler le générateur de fonction, faire le réglage nécessaire pour avoir un signal sinusoïdal d'amplitude 2V et de fréquence :

g)  $f=100\text{Hz}/5\text{kHz}/50\text{kHz}$ .

➤ Démarrer l'oscilloscope, lancer la mesure et relever l'oscillogramme.



➤ Interpréter le résultat pour les trois fréquences

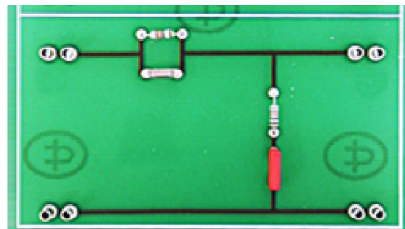
En faisant varier la fréquence de  $V_e$ , relever  $V_s$  puis remplir le tableau suivant :

Fréquence									
$V_s$									
$V_s/V_e$									
$G(\text{dB})$									
$\delta t$									
$\Phi(^{\circ})$									

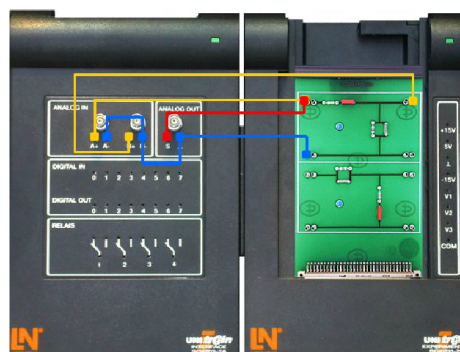
- Tracer un papier semi-logarithmique les courbes de Bode  $G(\text{dB})$  et  $\Phi(^{\circ})$  en fonction de la fréquence). En déduire sur ces courbes la fréquence centrale et les fréquences limites. Quelle est alors la bande passante du filtre ?
- Comparer les valeurs, théorique et pratique et conclure sur l'intérêt de ce filtre.

#### **5-4/ Etude du filtre coupe bande:**

Le Circuit ci-dessous, présente un filtre coupe bande du deuxième ordre avec deux résistances et deux condensateurs.



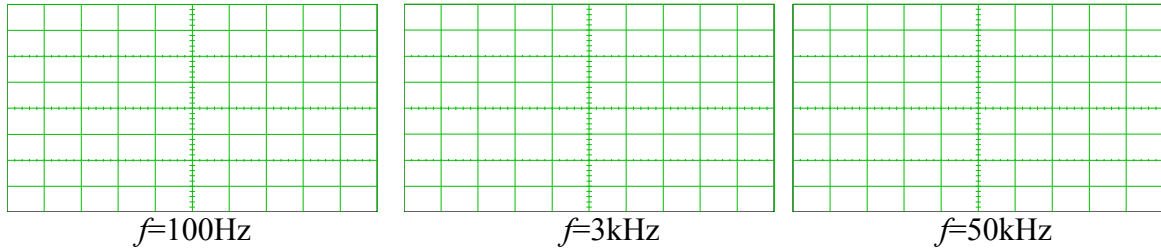
- Relever les valeurs de  $R_1$ ,  $R_2$  et  $C_1$ ,  $C_2$  sur la carte.
- Déterminer la fonction de transfert du montage et calculer la fréquence propre et les fréquences limites  $f_1$  et  $f_2$  de la bande coupée.
- Câbler les différents composants afin de réaliser le montage suivant



- Appeler le générateur de fonction, faire le réglage nécessaire pour avoir un signal sinusoïdal d'amplitude 2Volt et de fréquence :

h)  $f=100\text{Hz}/3\text{kHz}/50\text{kHz}$ .

- Démarrer l'oscilloscope, lancer la mesure et relever l'oscillogramme.



- Interpréter le résultat pour les trois fréquences

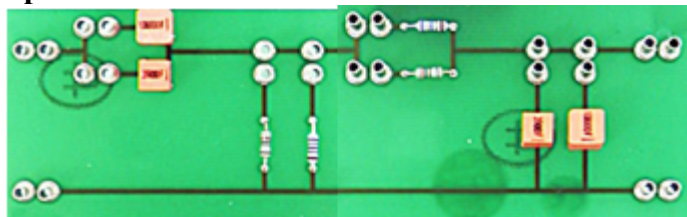
En faisant varier la fréquence de  $V_e$ , relever  $V_s$  puis remplir le tableau suivant :

Fréquence									
$V_s$									
$V_s/V_e$									
$G(\text{dB})$									
$\delta t$									
$\Phi(^{\circ})$									

- Tracer un papier semi-logarithmique les courbes de Bode  $G(\text{dB})$  et  $\Phi(^{\circ})$  en fonction de la fréquence). En déduire sur ces courbes la fréquence centrale et les fréquences limites. Quelle est alors la bande rejetée du filtre ?
- Comparer les valeurs, théorique et pratique et conclure sur l'intérêt de ce filtre.

### **5-5/ Mise en cascade**

En utilisant la carte d'essai « Passe-haut / passe-bas », SO-4201-6W, mettre les deux filtres en cascade **Passe-haut / passe-bas**.



- Etudier le comportement de  $V_s/V_e$  en fonction de la fréquence de ce circuit.
- Conclure sur le type de filtre.

Inverser maintenant la position cascade **Passe-bas / passe-haut**

- Etudier le comportement de  $V_s/V_e$  en fonction de la fréquence de ce circuit.
- Conclure sur le type de filtre.

### **6/ Conclusion générale**

- Conclure sur les types de filtre et leurs comportements en fréquence
- Donner des utilisations pratiques pour chaque type.

# TP02: synthèse des filtres analogiques

## 1/ Introduction

Un filtre idéal transmettrait toutes les composantes utiles sans atténuation ni déphasage (donc sans retard) tout en éliminant complètement les signaux indésirables. En pratique, la synthèse du filtre idéal est impossible. L'atténuation nulle dans la bande passante, l'atténuation infinie dans la bande atténuée et des transitions verticales donnent une caractéristique de réponse irréaliste. Nous sommes amenés à définir un gabarit, précisant :

- $A_{\max}$  : Atténuation maximum tolérée en bande passante
- $A_{\min}$  : Atténuation minimum en bande coupée
- $f_p$  : fréquence de coupure
- $f_a$  : fréquence de frontière

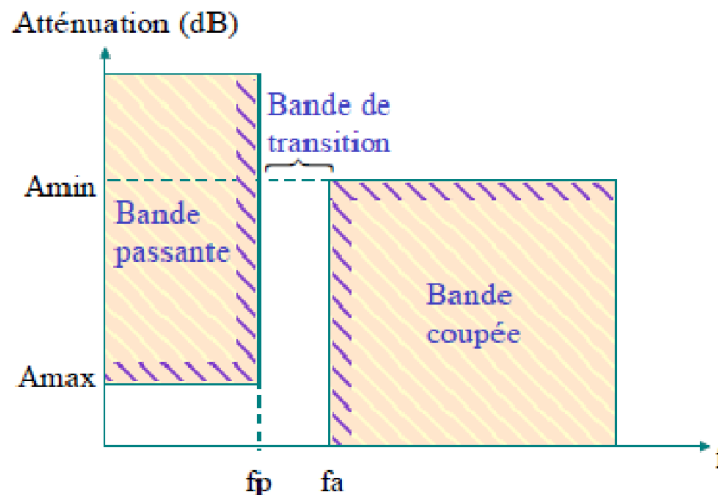


Figure 2: gabarit filtre passe bas

Cela conduit à un gabarit définissant des zones interdites et des zones dans lesquelles devront impérativement se situer les graphes représentant l'atténuation du filtre en fréquence.

## 2/ Objectifs TP:

- ✓ Dimensionner, suivant un cahier des charges donné, un filtre soit avec des composants passifs, soit avec des composants actifs
- ✓ Appliquer les formes de réponse les plus usuelles à savoir: Butterworth, Tchebychev & Cauer
- ✓ Choisir le type de réponse du filtre de telle sorte qu'il s'adapte au mieux aux besoins.

### 3/ Rappel théorique

#### ➤ Les différentes étapes de la synthèse d'un filtre analogique :

1. Définition du gabarit désiré
2. Normalisation du gabarit par rapport à une pulsation de référence  $\omega_r : j\omega/\omega_r \rightarrow s$
3. Transposition en gabarit (normalisé) passe-bas
4. Détermination de l'ordre du filtre (calcul, abaques, logiciel)
5. Recherche de la fonction de transfert normalisée à partir des tables de polynômes
6. Transposition du filtre passe-bas étudié vers le type de filtre recherché
7. Démoralisation :  $s \rightarrow j\omega/\omega_r$
8. Réalisation électronique

Remarque : dans le cas de la synthèse d'un filtre passe-bas, les étapes 2 et 5 n'ont pas lieu d'être.

#### ➤ Différentes formes de réponse

Les formes de réponses les plus usuelles sont les réponses de Butterworth, de Chebyshev, de Bessel et de Caer.

#### ✓ Réponse de Butterworth

C'est une réponse qui ne présente pas d'ondulation dans la bande transmise et le module de la fonction de transfert peut se mettre sous la forme:

$$|F(j\omega)| = \frac{1}{\sqrt{1+x^{2n}}} \quad \text{avec } x = f/f_p \text{ et } n \text{ l'ordre du filtre}$$

#### Détermination de l'ordre :

- *Première méthode* : Par le calcul, on peut déterminer le facteur  $\varepsilon$  et l'ordre  $n$  du filtre à partir des valeurs  $A_{\max}$ ,  $A_{\min}$  et  $x_a$  du prototype passe-bas.

$$\text{tels que } \varepsilon = \sqrt{10^{A_{\max}/10} - 1} \quad \text{et} \quad n \geq \frac{\log\left(10^{\frac{A_{\min}}{10}} - 1\right) - 2\log\varepsilon}{2\log(x_a)}$$

- *Deuxième méthode* : utilisation des abaques (Annexe 1.)
- *Troisième méthode* : La fonction **buttord** de Matlab permet de déterminer l'ordre du filtre à partir du gabarit non normalisé. La fonction **buttord** renvoie également la pulsation de coupure à -3 dB

#### Détermination de la fonction de transfert :

- *Première méthode* : utilisation des tables (Annexe 2.). Les tables sont en général fournies pour  $\varepsilon=1$ , soit pour  $A_{\max}=3$  dB. Elles donnent le polynôme de Butterworth, qui correspond au dénominateur de la fonction de transfert du prototype passe-bas. Il ne reste alors qu'à effectuer la transposition inverse (si nécessaire) et à dénormaliser.
- *Deuxième méthode* : La fonction **butter** de Matlab nous donne les coefficients de la fonction de transfert. noter que avec Matlab, on n'a pas besoin de normaliser et dénormaliser. Tout est transparent pour l'utilisateur.

#### ✓ Réponse de Tchebychev

C'est une réponse à coupure plus rapide, au voisinage de la fréquence de coupure, qu'une réponse de Butterworth, pour un ordre donné.

Le module de la réponse en amplitude vérifie la relation générale de la forme :

$$|F(j\omega)| = \frac{1}{\sqrt{1+\varepsilon^2 C_n^2(x)}} \quad \text{avec } \varepsilon \text{ est constante } \leq 1$$

$C_n(x)$  sont les polynômes de Tchebychev défini par une relation de récurrence:  
 $C_0(x) = 1; C_1(x) = x; C_{n+1}(x) = 2xC_n(x) - C_{n-1}(x), \dots$

Détermination de l'ordre :

- *Première méthode* : Par le calcul, on peut déterminer le facteur  $\varepsilon$  et l'ordre  $n$  du filtre à partir des valeurs  $A_{\max}, A_{\min}$  et  $x_a$  du prototype passe-bas.

$$\text{tels que } \varepsilon = \sqrt{10^{A_{\max}/10 - 1}} \quad \text{et} \quad n \geq \frac{\argch\left(\frac{\sqrt{\frac{A_{\min}}{10^{10} - 1}}}{\sqrt{\frac{A_{\max}}{10^{10} - 1}}}\right)}{\argch(x_a)}$$

- *Deuxième méthode* : utilisation des abaques (Annexe 3.)
- *Troisième méthode* : La fonction **cheblord** de Matlab permet de déterminer l'ordre du filtre à partir du gabarit non normalisé.

Détermination de la fonction de transfert :

- *Première méthode* : Les tables (Annexe 4.)s ont en général fournies pour différentes valeurs de l'ondulation (en dB). Elles donnent le dénominateur de la fonction de transfert du prototype passe-bas. Il ne reste alors qu'à effectuer la transposition inverse (si nécessaire) et à dénormaliser.
- *Deuxième méthode* : La fonction **cheby1** de Matlab nous donne les coefficients de la fonction de transfert.

✓ **Réponse elliptiques (ou de Caue)**

De tous les filtres possibles, ce sont ceux qui satisfont les exigences d'un gabarit donné avec une fonction de transfert d'ordre  $n$  minimal. Malheureusement, leur temps de propagation de groupe est extrêmement irrégulier, ce qui exclut leur utilisation quand la forme temporelle d'un signal doit être préservée. La courbe d'affaiblissement des filtres de Caue oscille entre les valeurs extrêmes autorisées par le gabarit, aussi bien en bande passante qu'en bande atténuée.

Détermination de l'ordre :

- *Première méthode* : utilisation des abaques (Annexe 5.)
- *Deuxième méthode* : La fonction **ellipord** de Matlab permet de déterminer l'ordre du filtre à partir du gabarit non normalisé.

Détermination de la fonction de transfert :

- *Première méthode* : La fonction **ellip** de Matlab nous donne les numérateur et dénominateur de la fonction de transfert.
- *Deuxième méthode* : utilisation des tables (Annexe 6.) Les tables sont en général fournies pour différents couples de valeurs de  $A_{\max}$  et  $A_{\min}$ . Elles donnent la fonction de transfert du prototype passe-bas. Il ne reste alors qu'à effectuer la transposition inverse et à dénormaliser.

#### 4/ Manipulation

- **Exercice type: synthèse d'un filtre passe bas**

**Cahier des charges :**

- Filtre passe bas.
- Affaiblissement maximal en bande passante : 10dB de 0 à 480Hz.
- Affaiblissement minimal en bande atténuée : 20dB au delà de 1100KHz.

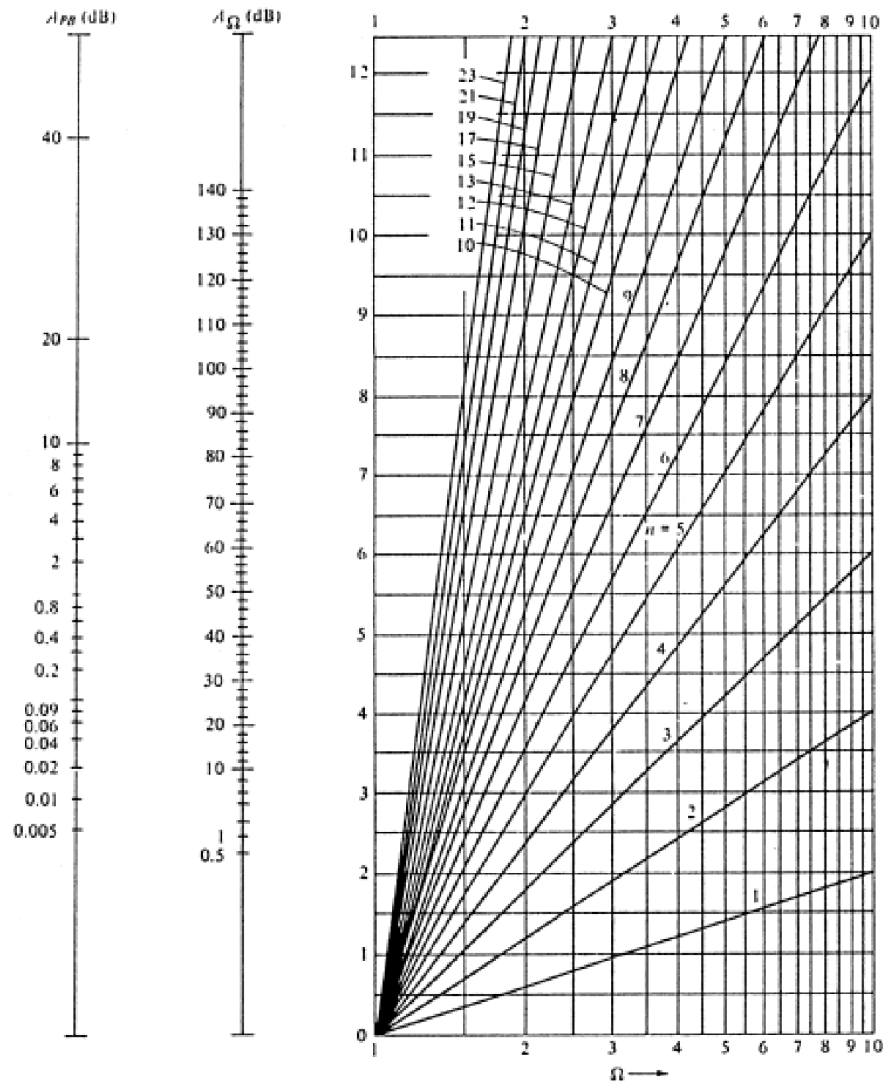
**Travail demandé :**

- ❖ Tracer le gabarit du filtre et le gabarit normalisé (à la main).
- ❖ Avec les réponses de Butterworth, Tchebycheff et Cauer:
  - ✓ Identifier l'ordre du filtre en utilisant les abaques et Matlab. Comparer les résultats avec le calcul par formule
  - ✓ Déterminer la fonction de transfert :
    - Calculer les polynômes normalisés à l'aide de Matlab.
    - Effectuer la décomposition des polynômes.
    - Comparer les résultats avec les données dans les tableaux en annexe
    - Ecrivez chaque fonction sous sa forme canonique
- ❖ Tracer avec Matlab les réponses Module et phase.
- ❖ Comparer les trois réponses en termes de performances (bande de transition, pente, ripple).
- ❖ Ce filtre peut-il être passif ou actif ?, justifier.
- ❖ Proposer un schéma électrique
- ❖ Donner une conclusion.



# Annexe 1

## BUTTERWORTH: ABAQUE POUR LA DÉTERMINATION DE L'ORDRE $n$



A nomograph for determining the order of a maximally flat magnitude function.

## Annexe 2

*Fonctions de transmission  $H(p) = V_1/V_2$  des filtres de Butterworth d'ordre 1 à 9.*

$$p + 1$$

$$p^2 + \sqrt{2}p + 1$$

$$p^3 + 2p^2 + 2p + 1$$

$$p^4 + 2,6131 p^3 + 3,4142 p^2 + 2,6131 p + 1$$

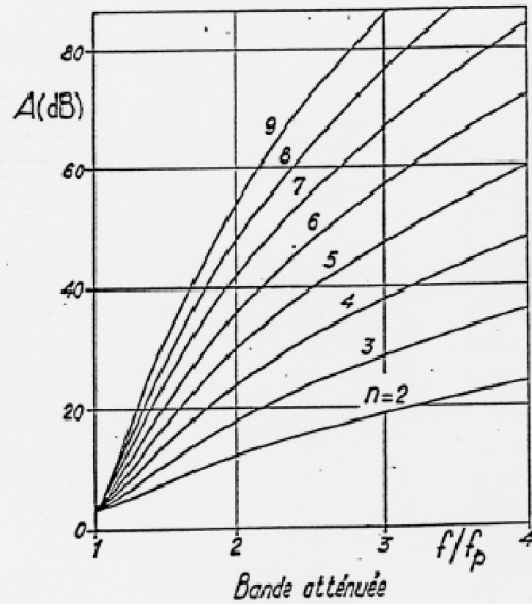
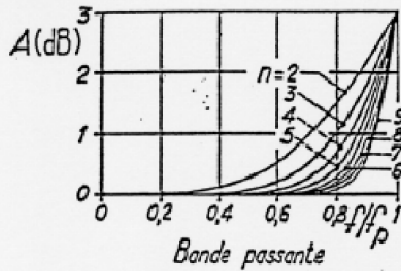
$$p^5 + 3,2361 p^4 + 5,2361 p^3 + 5,2361 p^2 + 3,2361 p + 1$$

$$p^6 + 3,8637 p^5 + 7,4641 p^4 + 9,1416 p^3 + 7,4641 p^2 + 3,8637 p + 1$$

$$p^7 + 4,4940 p^6 + 10,098 p^5 + 14,592 p^4 + 14,592 p^3 + 10,098 p^2 + 4,4940 p + 1$$

$$p^8 + 5,1528 p^7 + 13,137 p^6 + 21,846 p^5 + 25,688 p^4 + 21,846 p^3 + 13,137 p^2 + 5,1528 p + 1$$

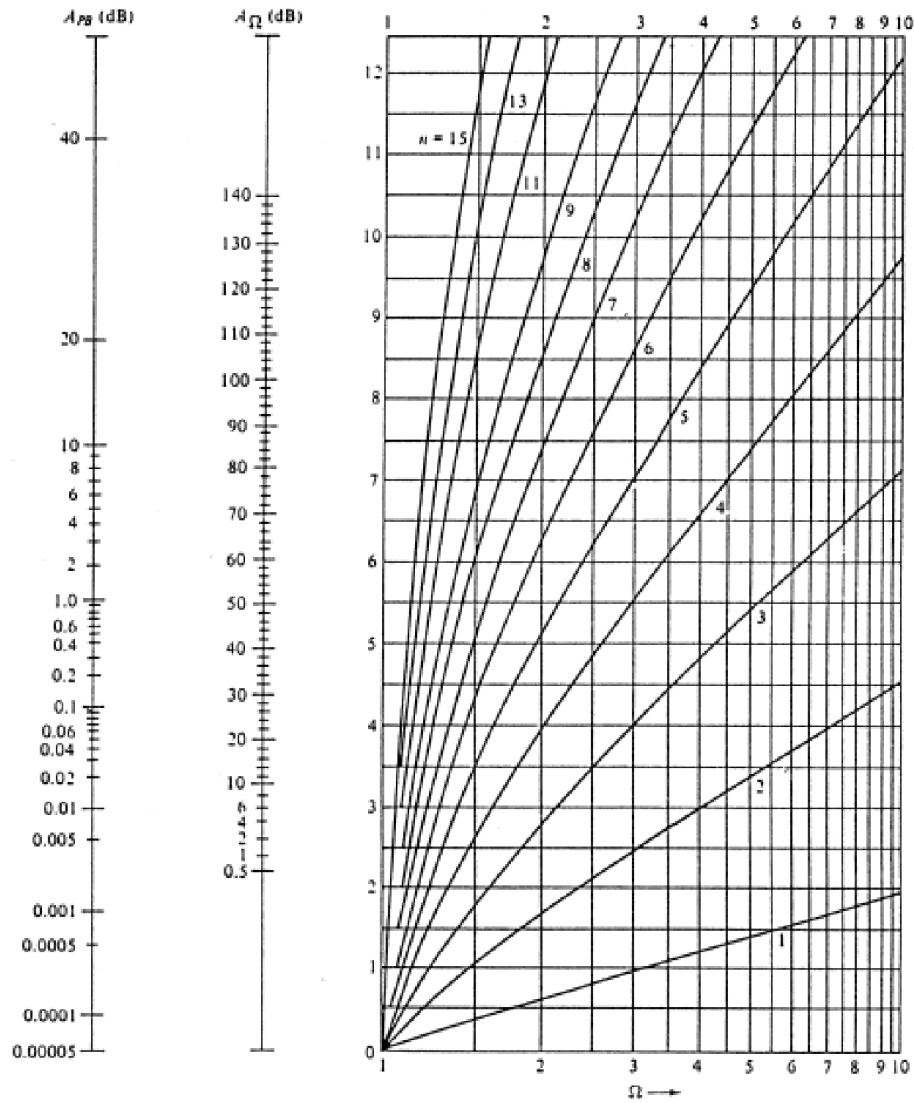
$$p^9 + 5,759 p^8 + 16,582 p^7 + 31,163 p^6 + 41,986 p^5 + 41,986 p^4 + 31,163 p^3 + 16,582 p^2 + 5,759 p + 1$$



FILTRES DE BUTTERWORTH : Courbe de l'atténuation en fonction de la fréquence

# Annexe 3

## CHEBYCHEV: ABAQUE POUR LA DÉTERMINATION DE L'ORDRE $n$



A nomograph for determining the order of an equal-ripple magnitude function.

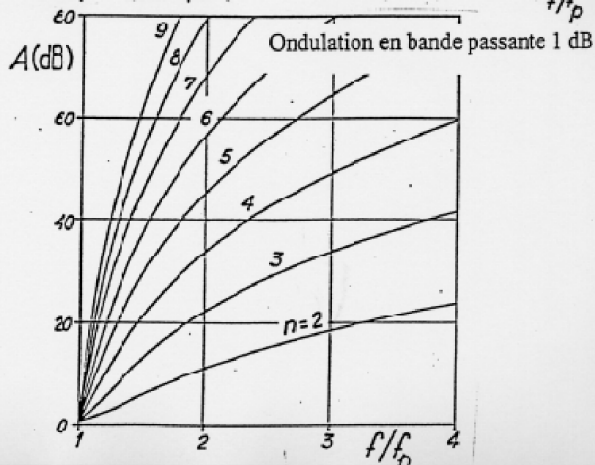
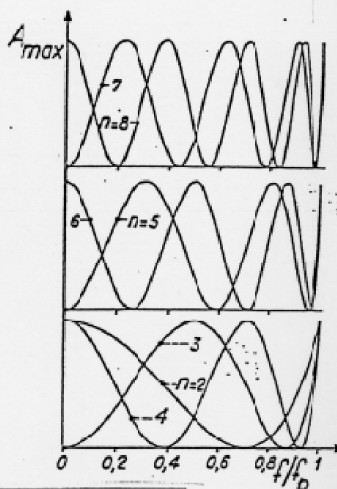
# Annexe 4

## Polynômes caractéristiques de Tchebycheff.

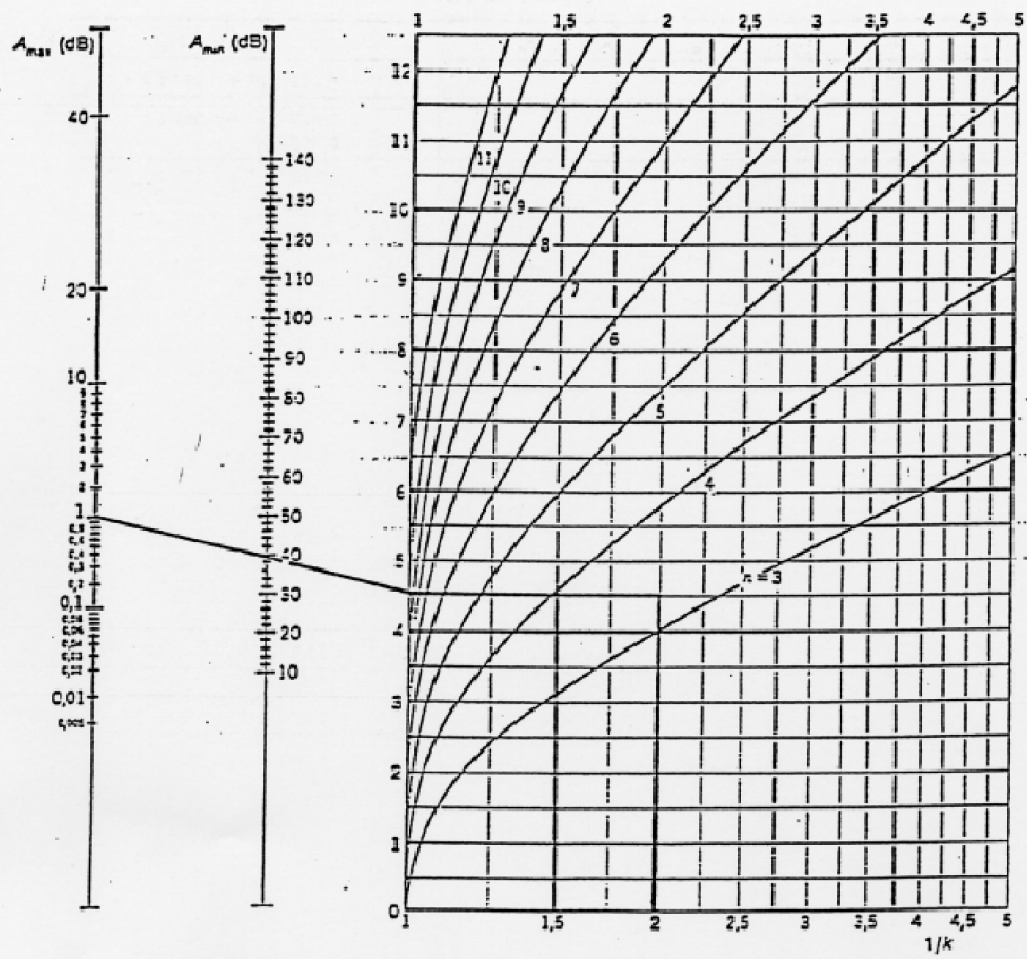
$T_1 = \omega$	$T_4 = 32 \omega^8 - 48 \omega^6 + 18 \omega^4 - 1$
$T_2 = 2 \omega^2 - 1$	$T_5 = 64 \omega^9 - 112 \omega^7 + 56 \omega^5 - 7 \omega$
$T_3 = 4 \omega^3 - 3 \omega$	$T_6 = 128 \omega^8 - 256 \omega^6 + 160 \omega^4 - 32 \omega^2 + 1$
$T_4 = 8 \omega^4 - 8 \omega^2 + 1$	$T_7 = 256 \omega^7 - 576 \omega^5 + 432 \omega^3 - 120 \omega + 9 \omega$
$T_5 = 16 \omega^5 - 20 \omega^3 + 5 \omega$	$T_n = 2 \omega T_{n-1} - T_{n-2}$

Fonctions de transmission  $H(p) = V_1/V_2$  des filtres de Tchebycheff d'ordre 2 à 7.

$A_{max} = 0,1 \text{ dB}$	$\epsilon = 0,16262$
$0,3017 p^2 + 0,7158 p + 1$	
$0,6105 p^2 + 1,1836 p^2 + 1,6052 p + 1$	
$1,2069 p^4 + 2,1771 p^3 + 3,1705 p^2 + 2,4447 p + 1$	
$2,4419 p^6 + 4,2586 p^5 + 6,7658 p^4 + 5,8531 p^3 + 3,5065 p + 1$	
$4,8279 p^8 + 8,2662 p^7 + 14,32 p^6 + 13,42 p^5 + 9,8868 p^4 + 4,3536 p + 1$	
$9,7677 p^{10} + 16,538 p^9 + 31,095 p^8 + 30,866 p^7 + 26,423 p^6 + 14,484 p^5 + 5,487 p + 1$	
$A_{max} = 0,5 \text{ dB}$	$\epsilon = 0,34931$
$0,6595 p^2 + 0,9402 p + 1$	
$1,3972 p^3 + 1,7506 p^2 + 2,1446 p + 1$	
$2,6381 p^4 + 3,1589 p^3 + 4,5293 p^2 + 2,7053 p + 1$	
$5,589 p^5 + 6,553 p^4 + 10,83 p^3 + 7,319 p^2 + 4,2058 p + 1$	
$10,552 p^6 + 12,232 p^5 + 22,918 p^4 + 16,776 p^3 + 12,366 p^2 + 4,553 p + 1$	
$22,355 p^7 + 25,736 p^6 + 53,937 p^5 + 41,792 p^4 + 36,84 p^3 + 16,89 p^2 + 6,306 p + 1$	
$A_{max} = 1 \text{ dB}$	$\epsilon = 0,50884$
$0,907 p^2 + 0,9957 p + 1$	
$2,0353 p^3 + 2,0116 p^2 + 2,5206 p + 1$	
$3,628 p^4 + 3,4568 p^3 + 5,2749 p^2 + 2,6942 p + 1$	
$6,1415 p^5 + 7,5271 p^4 + 13,75 p^3 + 7,933 p^2 + 4,7264 p + 1$	
$10,512 p^6 + 13,47 p^5 + 28,02 p^4 + 17,445 p^3 + 13,632 p^2 + 4,456 p + 1$	
$17,566 p^7 + 30,06 p^6 + 70,866 p^5 + 46,53 p^4 + 44,21 p^3 + 17,866 p^2 + 6,9584 p + 1$	



## Annexe 5

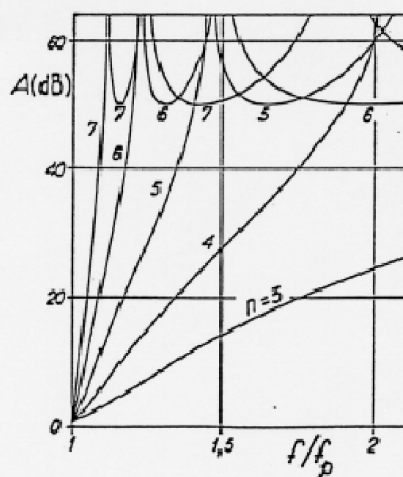


Abaque permettant la détermination de l'ordre  $n$  d'un filtre de Cauer, les paramètres  $A_{max}$ ,  $A_{min}$  et  $k$  étant donnés.

## Annexe 6

*Filtres de Cauer d'ondulation en bande passante  $A_{max} = 1$  dB et d'atténuation minimale en bande coupée  $A_{min} = 50$  dB.*

n	Cellule	$\omega_{c1}$	$\omega_{c2}$	$V_m$	$F^{-1}(p) = V_1/V_2$
3	1	3,974 5	1,054	1,808	$(1,000 p^2 + 0,475 7 p + 1)/(0,063 3 p^2 + 1)$ $1,959 p + 1$
	2				
4	1	4,664 4		3,084	$(3,086 p^2 + 2,177 9 p + 1)/(0,045 9 p^2 + 1)$ $(1,006 p^2 + 0,240 4 p + 1)/(0,239 6 p^2 + 1)$
	2	2,042 5	1,011		
5	1	2,152 3	0,796	4,181	$(1,870 p^2 + 0,849 8 p + 1)/(0,215 8 p^2 + 1)$ $(1,004 p^2 + 0,125 7 p + 1)/(0,470 4 p^2 + 1)$ $2,874 p + 1$
	2	1,457 9	1,001		
	3				
6	1	3,592 8		4,957	$(4,680 p^2 + 2,711 7 p + 1)/(0,077 4 p^2 + 1)$ $(1,398 p^2 + 0,381 6 p + 1)/(0,448 3 p^2 + 1)$ $(1,002 p^2 + 0,066 5 p + 1)/(0,670 1 p^2 + 1)$
	2	1,493 4	0,866		
	3	1,221 5	0,999		
7	1	1,879 8	0,714	5,441	$(2,339 p^2 + 0,967 5 p + 1)/(0,282 9 p^2 + 1)$ $(1,195 p^2 + 0,186 3 p + 1)/(0,653 9 p^2 + 1)$ $(1,001 p^2 + 0,035 3 p + 1)/(0,808 3 p^2 + 1)$ $3,231 p + 1$
	2	1,236 6	0,921		
	3	1,112 2	0,999		
	4				



# TP N°03 : Modulation et démodulation AM

## 1/Introduction

Les ondes électromagnétiques de fréquence élevée ont la propriété de se propager, soit dans l'atmosphère soit sur un support physique (guide d'onde, câble) sur de très grandes distances. Il est alors intéressant d'utiliser cette propriété afin de transmettre a distance une information contenue dans un signal base fréquence. On utilise alors la technique de modulation

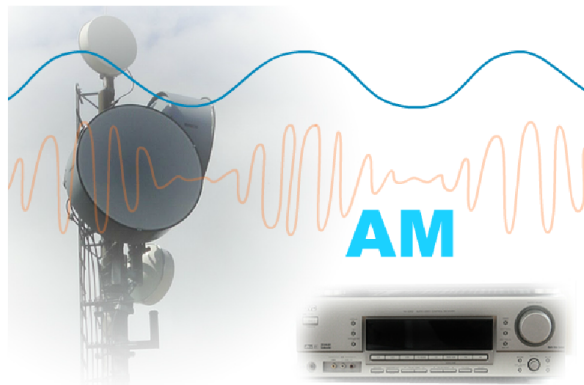


Figure1 : émetteur récepteur AM

Il existe plusieurs types de modulations, la *modulation d'amplitude* (radio AM, Amplitude Modulation) et la *modulation de fréquence* (radio FM, Frequency Modulation). On s'intéresse dans ce TP à la modulation d'amplitude.

## 2/ Objectifs TP:

- ✓ Comprendre le principe de la modulation et démodulation AM
- ✓ Observer la réponse temporelle et fréquentielle d'un signal AM
- ✓ Détermination du taux de modulation
- ✓ Voir les différents types de modulation AM avec leurs caractéristiques

### 3/ Rappel théorique

Moduler un signal en amplitude, c'est faire varier son amplitude au cours du temps à l'aide d'un autre signal. Dans la pratique, on module le plus souvent un signal sinusoïdal appelé **signal porteur** par un signal autre appelé **signal modulant**. Le résultat de cette modulation est appelé **signal modulé**.

Dans le cas de la modulation d'amplitude, il s'agit d'une forme de la modulation de signal où l'amplitude d'un signal porteur à haute fréquence est modifiée par un signal de modulation à basse fréquence (signal utile). Le signal de modulation représente une courbe enveloppe pour le signal porteur, comme le montre l'illustration suivante.

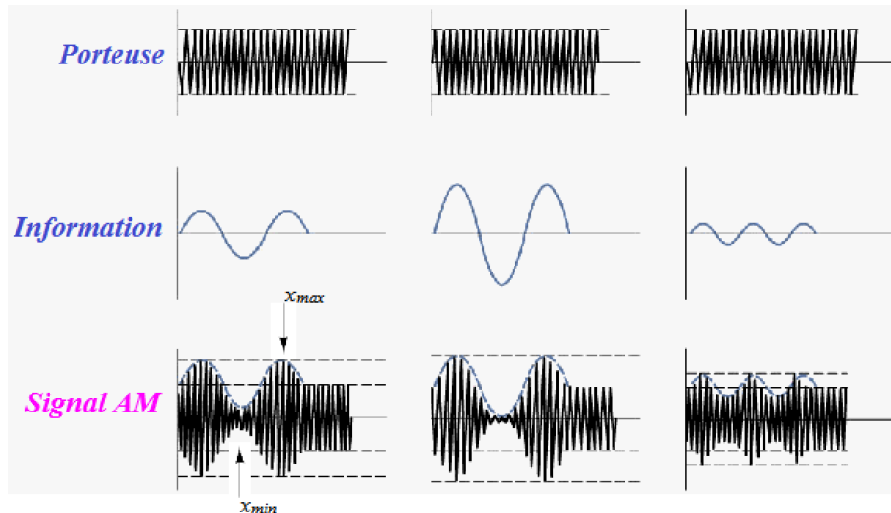


Figure 2: représentation temporelle d'un signal AM

D'un point de vue mathématique, la modulation AM est caractérisée par l'équation:

$$S_{AM}(t) = A_p [1 + k \cdot A_m \cos(\omega_m t)] \cos(\omega_p t)$$

avec  $m_a = k \cdot A_m$  c'est l'**indice de modulation** calculé par  $m_a = \frac{x_{max} - x_{min}}{x_{max} + x_{min}}$

Le trapèze de modulation (la représentation en mode XY) permet de définir très facilement le degré de modulation

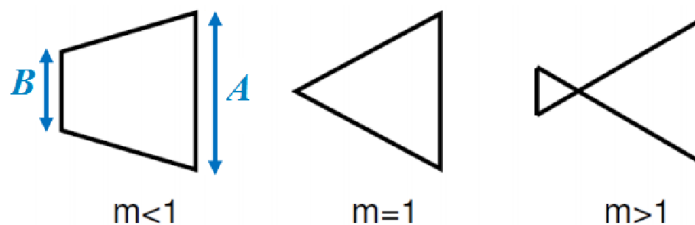


Figure 3 : trapèze de la modulation AM

tel que :  $m_a = \frac{A-B}{A+B}$

Le spectre de l'onde modulé AM fait apparaître, de part et d'autre de la pulsation centrale  $\omega_p$ , d'amplitude  $A_p$ , deux pulsations latérales ( $\omega_p + \omega_m$ ) et ( $\omega_p - \omega_m$ ) d'amplitude  $\frac{m_a A_p}{2}$ .



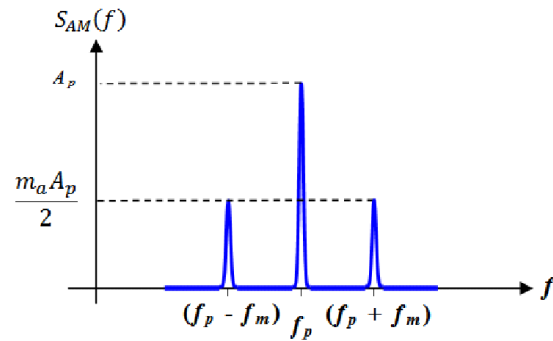


Figure 4: représentation fréquentiel d'un signal AM

**l'occupation spectrale** d'un signal AM :  $\beta = 2 \cdot f_m$  qui représente la largeur du canal de transmission.

L'opération inverse de la modulation permet de récupérer le signal information. La plus connue est **la démodulation par détection d'enveloppe**. Elle se réalise en deux étapes :

- la détection d'enveloppe: permettant de récupérer le signal d'enveloppe.
- l'élimination du signal continu: permettant de centrer le signal d'enveloppe.

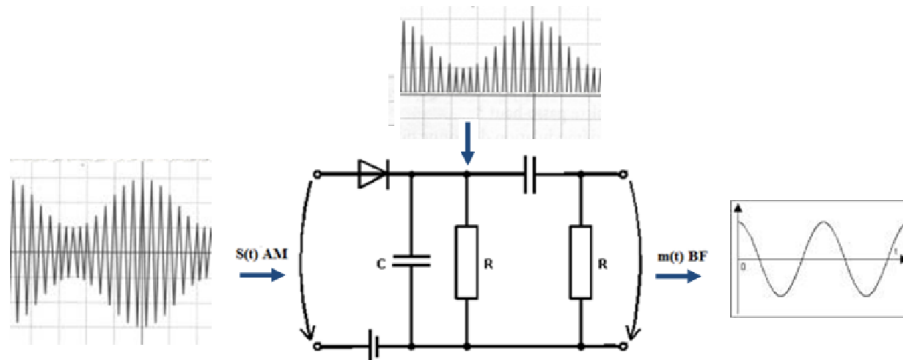


Figure 5: détecteur d'enveloppe

Au cours de la modulation d'amplitude appliquée habituellement à la transmission des ondes longues, moyennes et courtes, l'amplitude du signal porteur est supérieure à celle du signal utile, comme nous l'avons vu plus haut. Par ailleurs, le signal utile n'intervient qu'à 50% de sa valeur sur les deux bandes latérales. Ainsi, la majeure partie de la puissance d'émission est constituée de celle de la porteuse. Pour obtenir une part plus importante de puissance utile sur le signal émetteur, on profite de ce que la porteuse n'est pas nécessaire à la transmission à proprement parler des informations. Des circuits appropriés (comme des filtres) permettent de supprimer la porteuse et de conserver uniquement les bandes latérales supérieure (BLS) et inférieure (BLI).

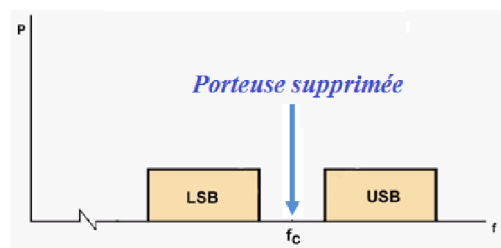


Figure 6: Spectre d'un signal AM double bande sans porteuse

Appelée **modulation AM à double bande latérale sans porteuse (DBSP)**, cette forme de modulation est appliquée par exemple lors de la transmission d'informations stéréophoniques dans le domaine FM. La suppression de la porteuse permet de transmettre des signaux utiles avec un rendement plus important et de les obtenir sans distorsion due à des degrés de modulation trop élevés. D'un point de vue purement mathématique, la valeur pour le degré de modulation est infinie.

Si l'on considère que l'information utile à proprement parler est contenue deux fois, à savoir dans les bandes latérales supérieure et inférieure, il en résulte le troisième sous-type de modulation d'amplitude : **la modulation à bande latérale unique (BLU)**, ou Single Side Band (SSB). On transmet seulement l'une des deux bandes latérales, ce qui permet d'utiliser au mieux la bande de fréquence disponible. La BLU est utilisée de préférence dans la transmission professionnelle des ondes courtes, afin d'économiser de la bande passante pour des raisons commerciales. C'est également pour ces raisons qu'elle est utilisée dans la technique de fréquence porteuse pour la transmission multicanal de communications téléphoniques.

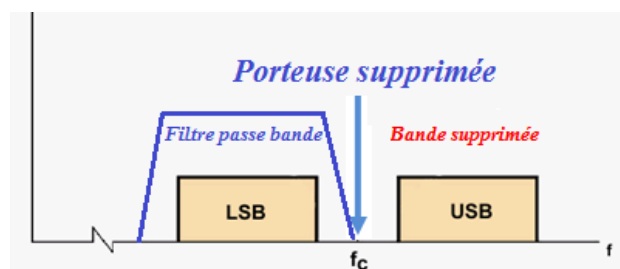


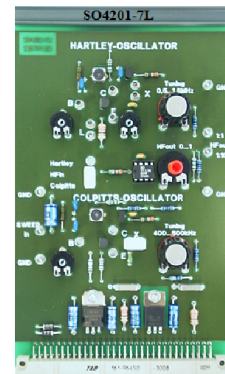
Figure 7: spectre d'un signal AM à bande latérale unique

Fondamentalement, il existe deux moyens pour produire la BLU. Le premier consiste à la générer depuis la modulation d'amplitude classique. On se sert pour cela d'un signal porteur, impossible à filtrer totalement, pour un signal de sortie, qui contient des superpositions. Par le second moyen, la BLU peut être générée directement depuis un signal DBL. Le porteur étant de toute manière supprimé en cas de modulation DBL, il en résulte un signal de sortie qui n'est plus constitué que d'une seule bande latérale.

## 4/ Matériels:

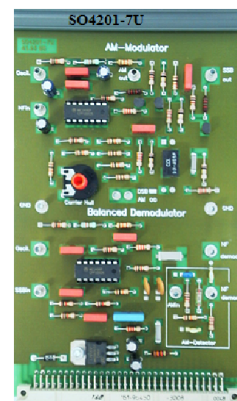
### 1/ Carte UniTrain-I « Oscillateur Hartley et Colpitts »

La carte d'essai SO4201-7L « Oscillateur Hartley et Colpitts » permet de réaliser des expériences sur la modulation d'amplitude comme oscillateur de fréquence porteuse pour le modulateur AM.



### 2/ Carte UniTrain-I « Modulateur / Démodulateur AM »

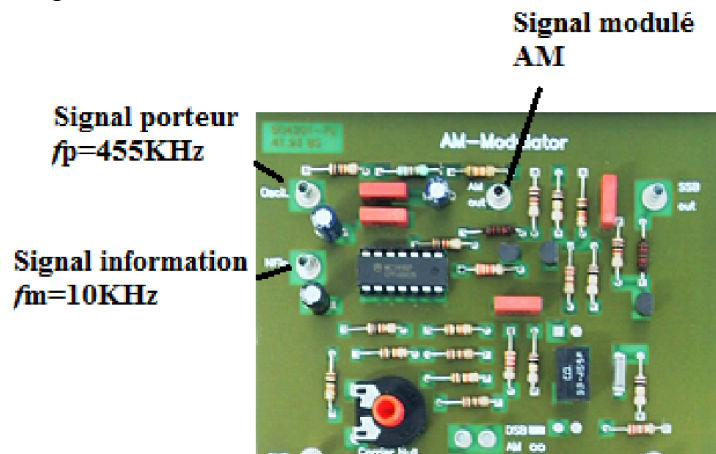
La carte d'essai SO4201-7U « Modulateur / Démodulateur AM » dispose d'un modulateur et d'un démodulateur montés discrètement. Le modulateur et le démodulateur permettent de réaliser la simple AM ainsi que la modulation à bande latérale unique et à double bande latérale.



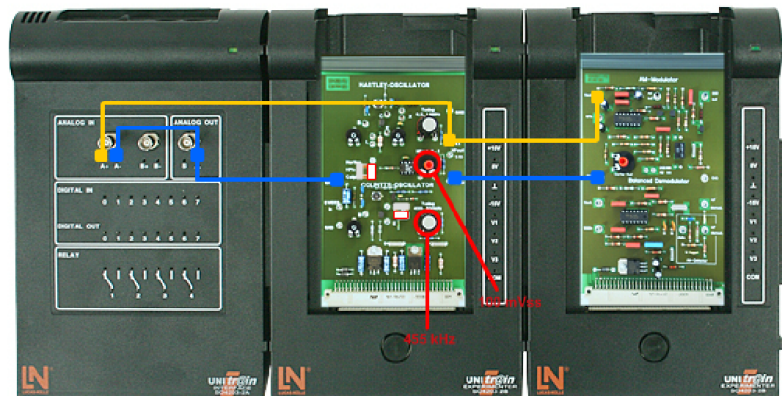
## 5/ Manipulations

### 5-1/ Principe de la modulation AM

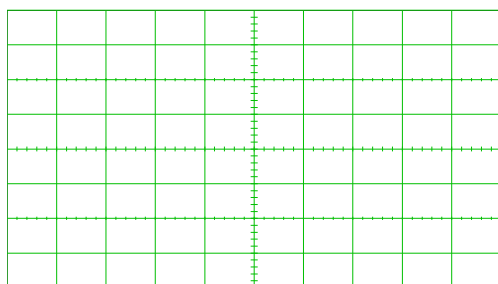
Le Circuit ci-dessous, présente un modulateur AM



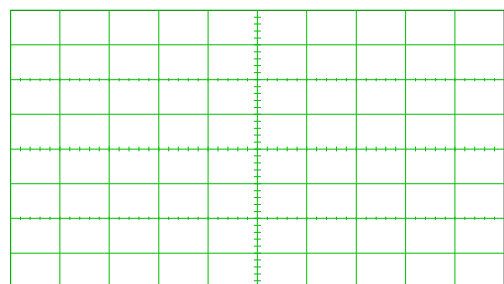
- Câbler les différents composants afin de réaliser le montage suivant



- Réglez d'abord sur l'oscillateur Colpitts le signal porteur avec les valeurs  $f_p = 455 \text{ kHz}$  et  $A_p = 50 \text{ mV}$ . À la sortie 1:1 de l'oscillateur, mesurez le signal de sortie avec le canal A de l'oscilloscope.
- À présent, avec le canal A de l'oscilloscope, mesurez le signal au point de mesure « AMout » du modulateur AM, puis copiez le résultat dans l'espace réservé.



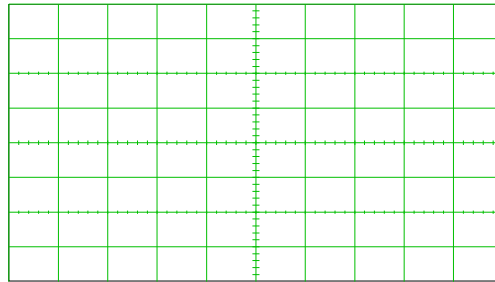
a) réglage de la porteuse  
AMout »



b) signal AM au point de mesure «

- Comparer les deux signaux à l'entrée et la sortie du modulateur. Expliquer ?
- Appeler le générateur de fonctions pour régler le signal modulant avec les caractéristiques suivantes : signal sinusoïdale de fréquence  $f_m=10\text{KHz}$  et amplitude  $A_m= 200\text{mV}$ .

- l) Appliquez le signal porteur et le signal modulant au modulateur avec les valeurs indiquées précédemment. Avec le canal A de l'oscilloscope, mesurez le signal de sortie du modulateur et, avec le canal B, le signal de modulant.



*Signal AM au point de mesure « AMout »*

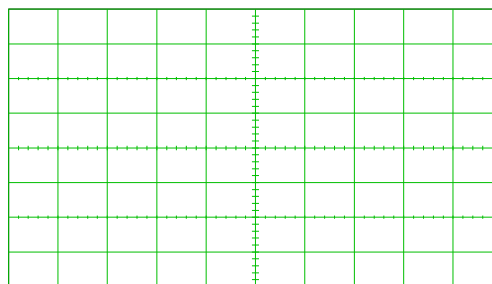
- Décrivez les signaux mesurés.
- Extraire les valeurs  $X_{\max}$  et  $X_{\min}$ . Calculer le taux de modulation  $m_a$ .

### **5-2/ Etude en fonction du taux de modulation:**

Au cours de cette expérience, vous allez mesurer un signal AM à différents degrés de modulation. Vous déterminerez ainsi les conséquences de différentes valeurs (supérieure ou inférieure à 1) du degré de modulation et vous représenterez dans un oscillogramme le trapèze de modulation à différents degrés de modulation. Vous pouvez reprendre le montage de l'expérience précédente.

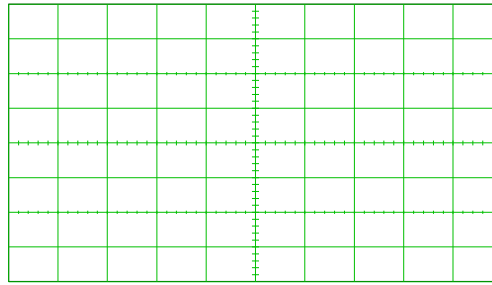
- a) Démarrez la mesure de l'oscilloscope « Mesurer en continu », avec le générateur de fonctions modifiez l'amplitude du signal BF en la réduisant lentement, puis en l'augmentant de nouveau. Comment se modifie le signal à la sortie « AMout » ?
- b) Réglez de nouveau le signal BF sur sa valeur initiale (200mV). Ensuite reliez le signal BF au canal A et le signal modulé AM au canal B de l'oscilloscope. Paramétrez l'oscilloscope en mode X-Y.

- Copiez le résultat dans le diagramme suivant.



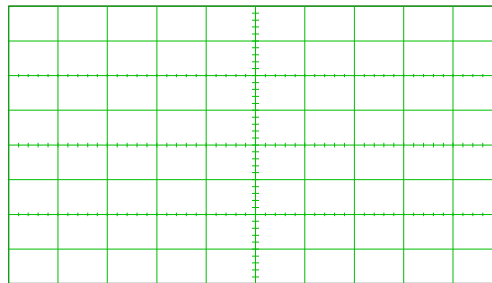
*Mode X-Y*

- Quelle est la forme géométrique de l'oscillogramme ?
  - Calculez le taux de modulation  $m_a$
  - Modifiez l'amplitude du signal BF en la réduisant lentement vers zéro, puis en l'augmentant de nouveau. Décrivez la modification de la représentation X-Y.
- c) Réglez un degré de modulation d'environ 100%. Copiez le résultat dans le diagramme suivant.



*Degré de modulation 100%*

- Quelle est la forme du signal dans la représentation X-Y avec un degré de modulation d'environ 100% ?
- d) À présent, continuez à augmenter l'amplitude BF (générateur de fonctions env. 80%) et copiez le résultat dans le diagramme suivant.



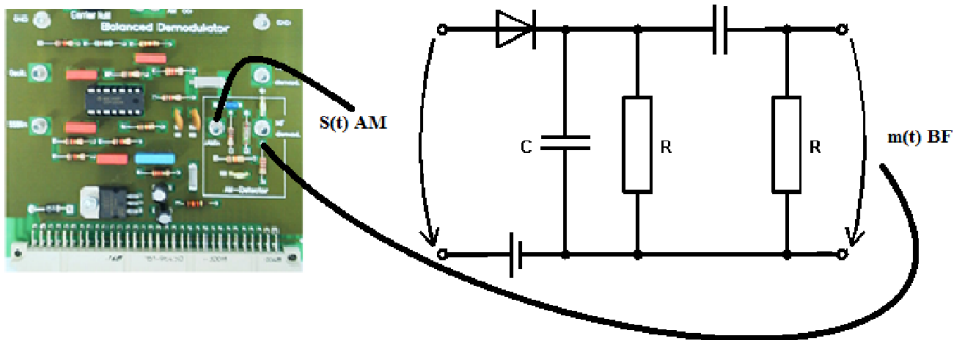
*Variation de l'amplitude BF*

Ignorez les éventuelles distorsions du signal provenant du dimensionnement du modulateur.

- Décrivez le signal et interprétez le résultat.
- À quoi sert la représentation X-Y du signal AM sur l'oscilloscope ?

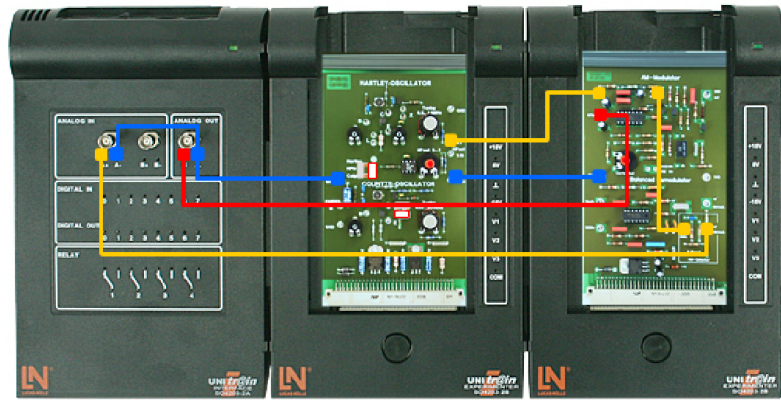
### **5-3/ Démodulation AM:**

Au cours de cette expérience, vous allez étudier la récupération du signal modulant à partir d'un signal modulé en amplitude et faire connaissance avec un circuit démodulateur simple.

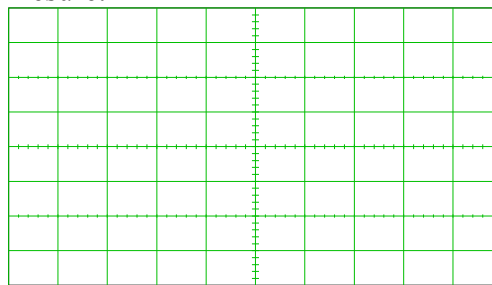


La figure représente un démodulateur AM simple. Décrivez son fonctionnement.

Montez le circuit d'expérimentation suivant :



Avec l'oscilloscope, mesurez le signal à la sortie « NFdemod » du détecteur AM et commentez le résultat de la mesure.

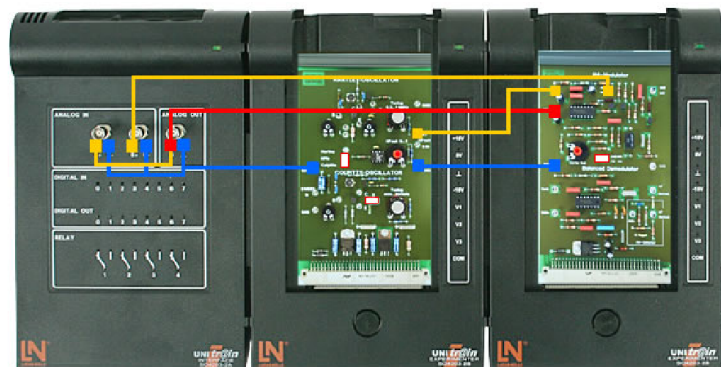


*Signal démodulé AM*

Comparez le signal à la sortie du démodulateur avec le signal BF alimenté. Justifiez.

#### **5-4/ Modulation Double Bande sans porteuse DBL:**

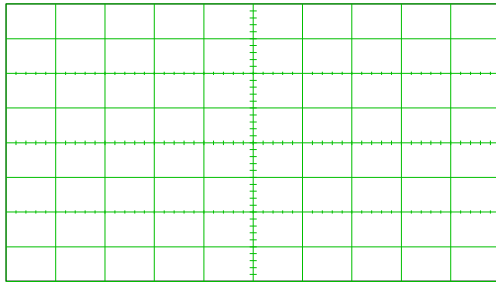
Au cours de cette expérience, nous allons illustrer le principe de la modulation à double bande latérale sans porteuse. Les mesures avec l'oscilloscope permettront de montrer qu'avec la modulation DBL, le porteur est supprimé presque intégralement dans son amplitude et que seules les deux bandes latérales sont transmises. Montez le circuit d'expérimentation suivant :



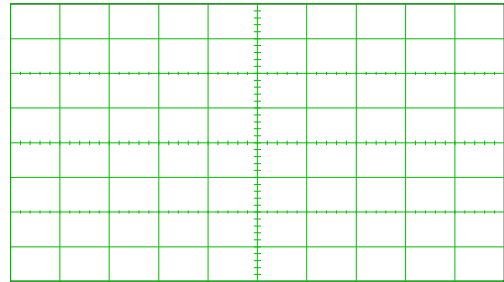
- Insérez la fiche de connexion en pont dans les contacts DSB/AM du modulateur AM.
- Sur l'oscilloscope Colpitts, augmentez l'amplitude du signal porteur à 100 mV.
- À la sortie 1:1 de l'oscillateur, mesurez le signal de sortie avec le canal A de l'oscilloscope.
- Ensuite, mesurez le signal à la sortie « AMout » (sans signal de modulation).
- Décrivez le signal mesuré a la sortie du modulateur.

Réduisez la valeur (résidu porteur) au point de mesure « AMout » à l'aide du potentiomètre « Carrier Null » (environ en position centrale). Ouvrez le Générateur de fonctions et régler un signal sinusoïdale de fréquence 10KHz et d'amplitude 500mV.

- Mesurez le signal BF avec le canal A de l'oscilloscope et le signal de sortie DBL avec le canal B.
- Représentez le résultat de la mesure à l'aide de la représentation X-Y de l'oscilloscope



*Signal DBL en mode X-T*



*Signal DBL en mode X-Y*


- Décrivez le signal mesuré à la sortie du modulateur par rapport un signal modulé AM dans les 2 cas de représentation.

### **5-5/ Représentation spectrale**

Au cours de cette expérience, vous allez comparer le spectre d'un signal AM avec celui d'un signal DBL sans porteuse.

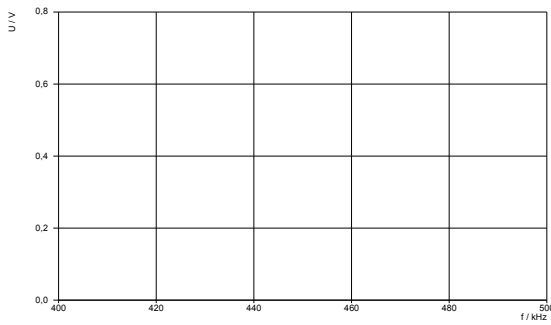
Vous pouvez reprendre le montage de l'expérience précédente.

- Ouvrez l'analyseur de spectre et paramétrez-le comme le montre le tableau suivant.

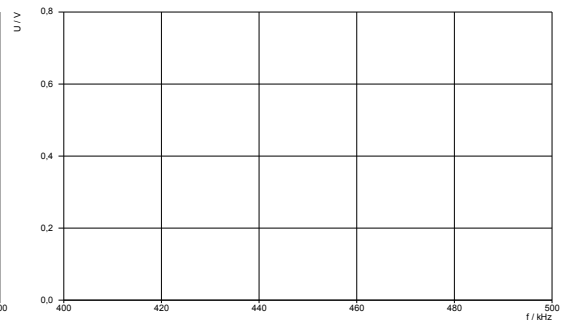
Instrument :	 <b>Analyseur de spectre</b>
Canal :	B, 50 V, DC
Valeurs :	2508
Facteur de temps :	70
Axe X :	400 - 500 kHz
Axe Y :	0 - 0,8 V

- Mesurez d'abord le spectre du signal AM. Retirez pour cela la fiche de connexion en pont DBL du modulateur AM.
- Réglez le potentiomètre « Carrier Null » de manière à ce que le signal porteur soit pratiquement déformé (presque en butée droite).
- Démarrez la mesure (mesure continue). Arrêtez la mesure et copiez le résultat dans l'espace réservé ci-dessous.





*Spectre signal AM*



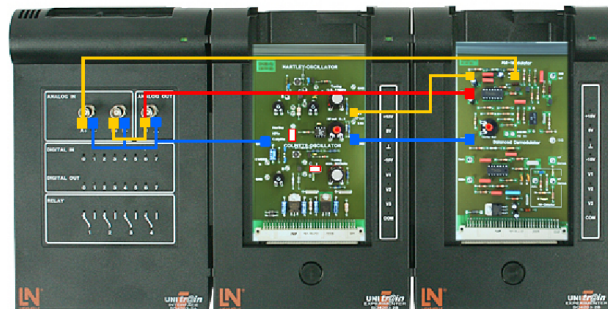
*Spectre signal AM DBL*

- Mesurez maintenant le spectre du signal DBL. Remettez la fiche de connexion en pont DSP. Copiez le résultat.
- Décrivez les deux spectres, quelles sont les modifications DBL, comparées à la mesure AM?
- Au regard des spectres mesurées, quel avantage la DBL présente-t-elle par rapport à la modulation d'amplitude simple ?

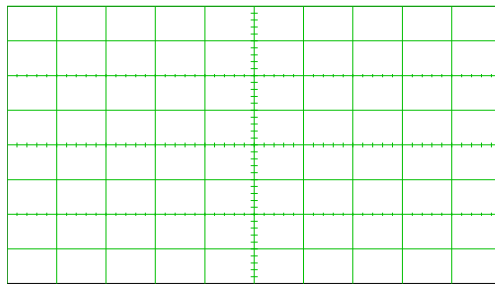
### **5-6/ Modulation à Bande Latérale Unique BLU :**

Au cours de cette expérience, vous allez étudier un signal BLU (à bande latérale unique) générée à partir d'un signal AM. Ensuite, vous allez comparer les signaux AM et BLU.

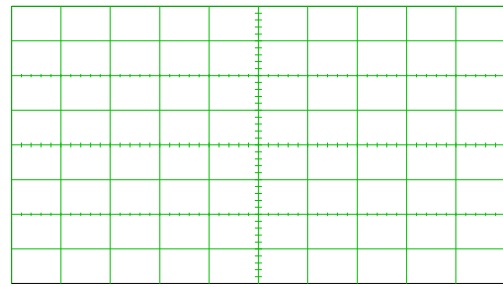
Montez le circuit d'expérimentation suivant :



- Réglez d'abord sur l'oscillateur Colpitts le signal porteur avec les valeurs  $f_p = 446 \text{ kHz}$  et  $A_p = 50 \text{ mV}$ .
- Appeler le générateur de fonctions pour régler le signal modulant avec les caractéristiques suivantes : signal sinusoïdale de fréquence  $f_m = 6 \text{ kHz}$  et amplitude  $A_m = 400 \text{ mV}$ .
- Dans l'oscilloscope, désactivez l'affichage pour le canal B (OFF). Copiez le signal AM mesuré dans le champ ci-après.
- À présent, branchez le canal A de l'oscilloscope au point de mesure « SSBout » et copiez le résultat dans l'espace réservé



*Signal AM*

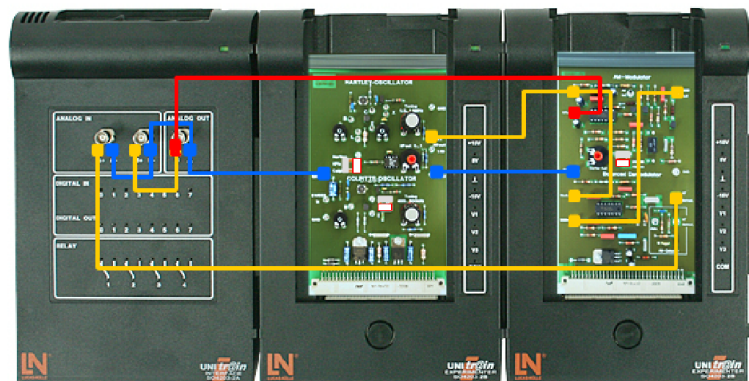


*Signal BLU*

- Comparez les signaux mesurés.
- Ouvrez l'analyseur de spectre et mesurez les spectres des deux signaux AM et BLU, commenter les résultats.

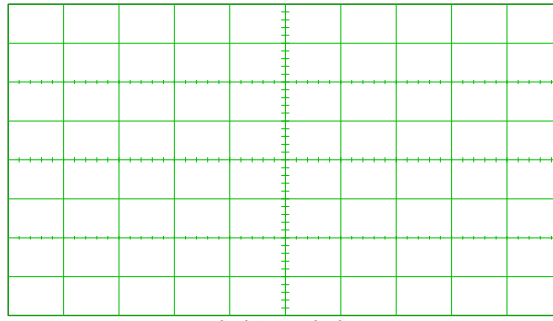
### **5-7/ Démodulation BLU:**

Au cours de cette expérience, vous allez récupérer un signal BLU avec un démodulateur équilibré. Montez le circuit d'expérimentation suivant :



- Réglez d'abord sur l'oscillateur Colpitts le signal porteur avec les valeurs  $f_p = 446 \text{ kHz}$  et  $A_p = 50 \text{ mV}$ .
- Appeler le générateur de fonctions pour régler le signal modulant avec les caractéristiques suivantes : signal sinusoïdale de fréquence  $f_m = 6 \text{ kHz}$  et amplitude  $A_m = 500 \text{ mV}$ .
- Avec le canal A de l'oscilloscope, mesurez le signal à la sortie « NFdemod » du démodulateur et, avec le canal B, le signal modulant. Copiez le résultat dans le champ ci-après.
- Comparez les signaux mesurés.

Maintenant, retirez le signal porteur de la douille « Oscil » du démodulateur et décrivez ce qui se passe sur la sortie « NFdemod ». Expliquez le résultat.



*Signal démodulé BLU*

**6/ Conclusion générale**

- Conclure sur les types de modulation et leurs avantages.
- Quelle est la place de la modulation AM aujourd'hui.

# TP N°03 : Modulation et démodulation

## FM

### 1/ Introduction:

La modulation AM repose sur la variation de l'amplitude de la porteuse en fonction de l'information à transmettre, le signal est très sensible au bruit et à l'atténuation. Pour la modulation angulaire l'amplitude de la porteuse est fixe, l'information portée par la phase ou par la fréquence c'est à dire l'information module la phase instantanée de la porteuse.



*Figure 1 : émetteur FM*

La modulation de fréquence est une technique permettant de transmettre des informations par onde radio ou par voie filaire. Aussi la modulation de fréquence est-elle appliquée dans la technique de radiotransmission UHF/VHF (radio FM) et dans la transmission radio par faisceau hertzien. De nos jours, elle est de plus en plus remplacée par des procédés de transmission numériques.

### 2/ Objectifs

- Principe de la modulation de fréquence
- Analyser le spectre d'un signal modulé FM
- Rapport entre amplitude / fréquence BF et déviation de phase
- Démoduler un signal modulé FM

### 3/ Rappel théorique

La **modulation de fréquence FM** est un procédé de modulation analogique. Une oscillation à haute fréquence sinusoïdale continue est utilisée comme porteur pour l'oscillation de signal à transmettre. La fréquence et l'amplitude sont les paramètres déterminants d'un signal de modulation analogique qui doivent être transmis. En modulation de fréquence (FM), on fournit ces paramètres pour la transmission en modifiant la fréquence du signal porteur. L'amplitude du signal porteur reste inchangée.

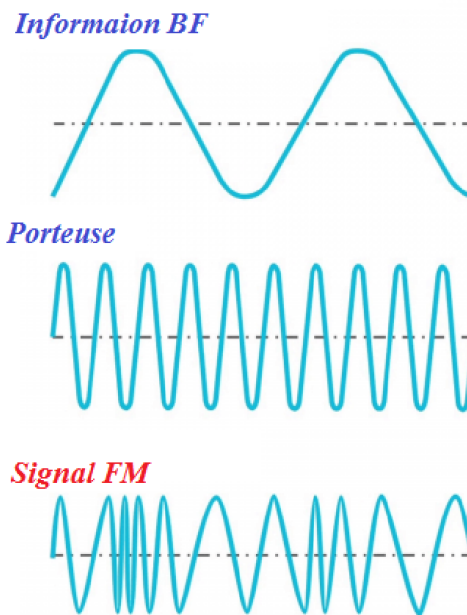


Figure 2: Représentation temporelle d'un signal FM.

Mathématiquement, la modulation de fréquence peut être décrite de la manière suivante :

$$S(t)_{FM} = A_p \cos(\omega_p t + 2\pi k \int m(t) dt) \quad \text{si } m(t) = A_m \cos(\omega_m t)$$
$$\text{alors } S(t)_{FM} = A_p \cos\left(\omega_p t + \frac{2\pi k A_m}{\omega_m} \sin(\omega_m t)\right)$$

avec  $\Delta\Omega = 2\pi k A_m$  est la **déviatiion de fréquence**

La fréquence du signal porteur est modifiée en fonction du signal de modulation. Le rapport entre la déviation de fréquence  $\Delta\Omega$  et la fréquence de modulation  $\omega_m$  est appelée **indice de modulation**.

$$m_f = \frac{\Delta\Omega}{\omega_m}$$

La déviation de fréquence exprime l'écart maximum de la fréquence pendant la modulation.

Tandis que la modulation d'amplitude ne génère qu'une bande latérale supérieure et une bande latérale inférieure, l'analyse du **spectre FM** d'un signal de modulation sinusoïdal montre des fréquences latérales dont la quantité dépend de l'indice de modulation. Chaque fréquence latérale se situe dans un multiple entier de la fréquence de modulation au-dessus et au-dessous de la fréquence porteuse.

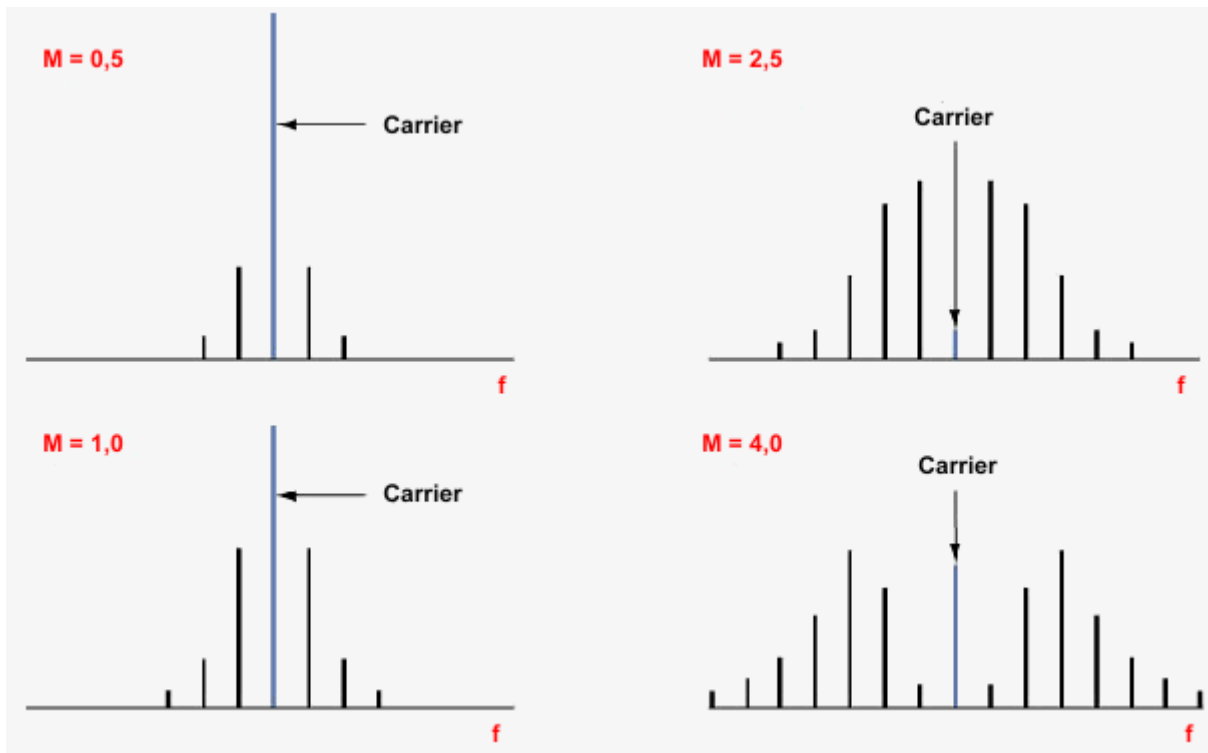


Figure 3: Spectre d'un signal FM avec différents valeurs d'indice de modulation.

Les amplitudes des fréquences latérales FM peuvent être déterminées à l'aide des fonctions Bessel du premier mode, de l'ordre n (figure3).

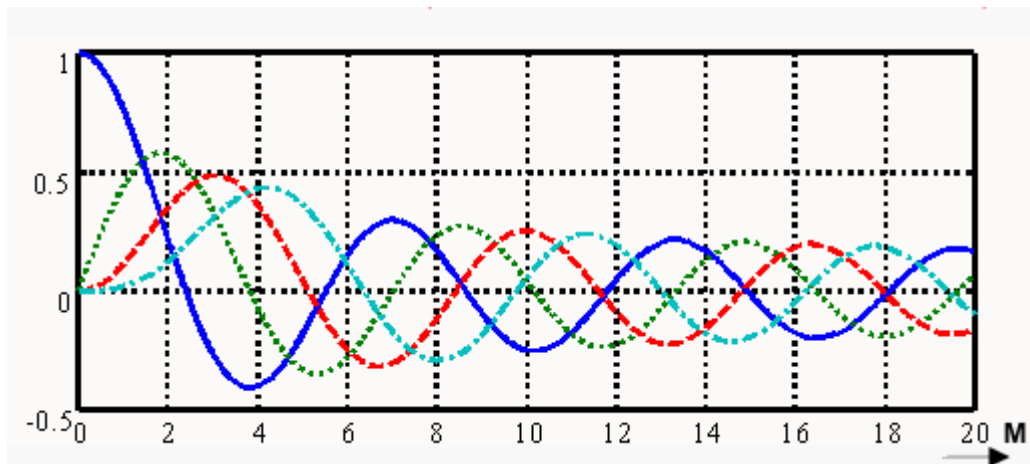


Figure 4: fonctions de Bessel du premier mode.

Le grand nombre de fréquences latérales au cours de la modulation de fréquence (qui doivent également être toutes transmises dans la mesure du possible) nécessite une bande passante relativement importante.

**l'occupation spectrale  $\beta$**  d'un signal FM est dépendante de la valeur de l'indice de modulation.

➤  $m_f \ll 1 \Rightarrow \beta = 2f_m$  c'est la même bande qu'un signal AM.

- $m_f > 1 \Rightarrow \beta = 2f_m[m_f + 1]$  c'est la règle de Carson.
- $m_f \gg 1 \Rightarrow \beta = 2f_m \cdot m_f$ .

Il existe plusieurs circuits qui permettent de **démoduler un signal FM**. On parle ici des démodulateurs non cohérents ou discriminateurs dont le principe est de transformer la modulation de fréquence ou de phase en modulation d'amplitude et d'effectuer une détection d'enveloppe. La transformation  $FM \rightarrow FM + AM$  est réalisée au moyen d'un filtre dérivateur.

soit le signal FM:  $S(t)_{FM} = A_p \cos(\omega_p t + \varphi(t))$  avec  $\varphi(t) = 2\pi k \int m(t) dt$

si on dérive  $S(t)_{FM} \Rightarrow \frac{dS(t)_{FM}}{dt} = -A_p \left[ \omega_p + \frac{d\varphi(t)}{dt} \right] \sin(\omega_p t + \varphi(t))$

$$\frac{dS(t)_{FM}}{dt} = -2\pi A_p [f_p + k_f m(t)] \sin(\omega_p t + \varphi(t))$$

Le signal  $\frac{dS(t)_{FM}}{dt}$  est un signal FM dont l'enveloppe (Amplitude) est une fonction linéaire du signal modulant. Donc une détection d'enveloppe permet de récupérer  $m(t)$ . Le démodulateur non cohérent (discriminateur) est présenté par le schéma fonctionnel suivant :

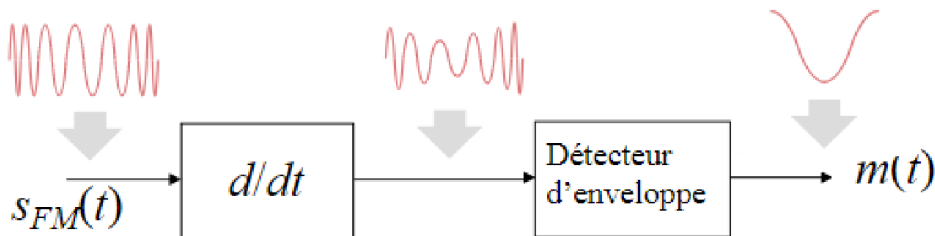
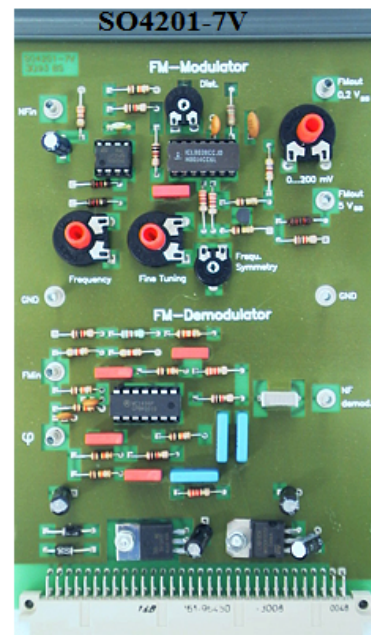


Figure 5: démodulateurs FM non cohérents.

#### 4/ Matériels:

##### Carte UniTrain-I « Modulateur / Démodulateur FM »

La carte d'essai SO4201-7V « Modulateur / Démodulateur FM » dispose d'un modulateur et d'un démodulateur FM montés discrètement. Le modulateur et le démodulateur peuvent être utilisés séparément. Le démodulateur se présente sous la forme d'un discriminateur de phase.

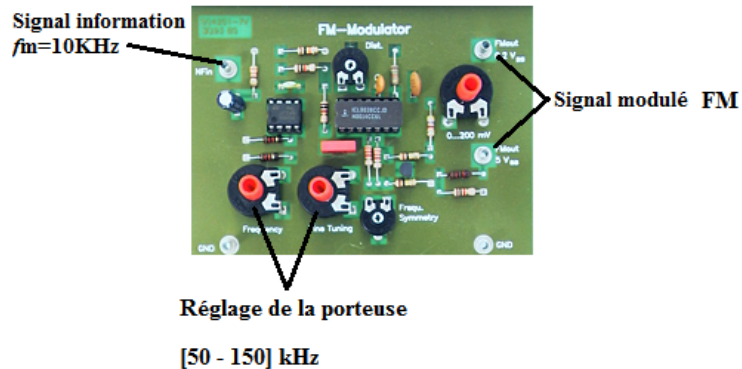


## 5/ Manipulations

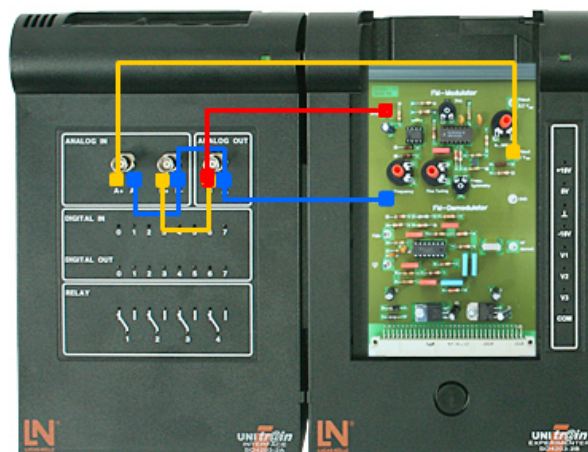
### 5-1/ Principe de la modulation FM

Au cours de cette expérience, nous allons représenter les caractéristiques du signal FM dans le domaine temporel à l'aide de mesures réalisées avec l'oscilloscope

Le Circuit ci-dessous, présente un modulateur FM



Câbler les différents composants afin de réaliser le montage suivant

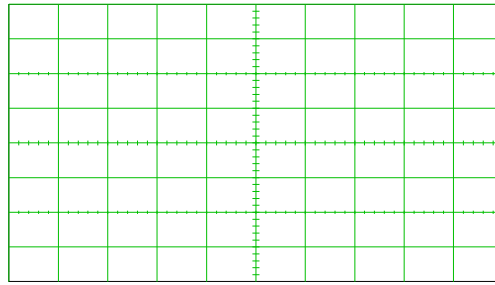


Dans un premier temps, réglez une fréquence porteuse de 100 kHz sur le modulateur FM. Utilisez pour cela des deux potentiomètres « Frequency » et « Fine Tuning ». Pour le réglage, utilisez l'oscilloscope.

À présent, avec le générateur de fonctions, réglez un signal d'une fréquence de 10 kHz et d'une amplitude de 2 V<sub>SS</sub>. Appliquez ce signal à l'entrée « NFin ».

Avec le canal A de l'oscilloscope, mesurez le signal à la sortie du modulateur et, avec le canal B, le signal BF. Copiez le résultat dans le champ ci-après.





*Signal FM au point de mesure « FMout »*

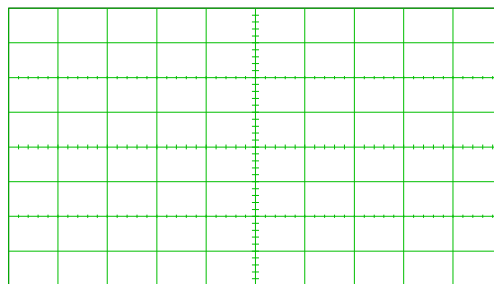
- Décrivez le signal mesuré.
- Comment se comporte le signal à la sortie du modulateur :
  - ✓ Si aucun signal BF n'est appliqué
  - ✓ Si un signal BF est appliqué
- Comment se modifie la fréquence instantanée du signal FM :

### **5-2/ Déviation de fréquence**

Au cours de cette expérience, vous allez étudier le signal FM avec un signal de modulant rectangulaire et déterminer ainsi la déviation de fréquence du signal FM.

Vous pouvez reprendre le montage de l'expérience précédente. Conservez le réglage de l'expérience précédente, mais transformez la forme du signal du générateur BF de signal sinusoïdal en signal rectangulaire.

Mesurez le signal d'entrée et le signal FM et copiez le résultat dans l'espace réservé ci-dessous.



*Signal FM avec signal BF rectangulaire*

- Qu'observe-t-on sur le signal FM mesuré ?
- Que représentent les zones visibles dans le signal FM à fréquence pratiquement constante ?
- À l'aide du signal de sortie mesuré, expliquez la déviation de fréquence.
- À partir du résultat de la mesure, déterminez les fréquences instantanées max et min et la déviation de fréquence qui en résulte.
  - ✓ La fréquence instantanée max s'élève à  $f_{max} = \dots\dots\dots$
  - ✓ La fréquence instantanée min s'élève à  $f_{min} = \dots\dots\dots$


✓ La déviation de fréquence s'élève à  $\Delta F = \dots\dots\dots$

**5-3/ Spectre de la modulation de fréquence**

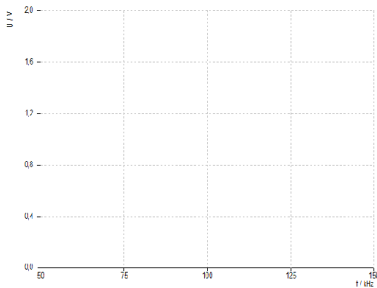
Au cours de cette expérience, vous allez étudier le spectre d'un signal FM à différentes fréquences du signal modulant. L'indice de modulation des signaux FM étudiés est déterminé par la comparaison avec des spectres d'un indice de modulation connu.

Vous pouvez reprendre le montage de l'expérience précédente. Avec le générateur de fonctions, réglez un signal sinusoïdal d'une fréquence de 5kHz et d'une amplitude de  $0.6V_{SS}$ .

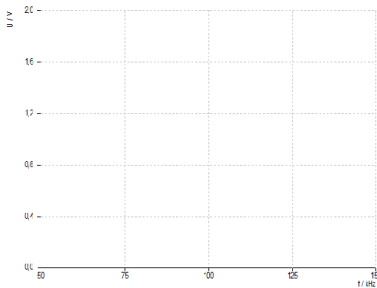
Ouvrez l'analyseur de spectre et paramétrez-le suivant le ce tableau.

Instrument :	 <b>Analyseur de spectre</b>
Canal :	A, 50 V, DC
Valeurs :	4001
Facteur de temps :	80
Axe X :	50 - 150 kHz
Axe Y :	0 - 2 V

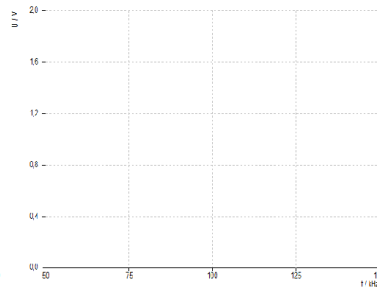
Mesurez le spectre à différentes fréquences du signal modulant : 5, 10 et 15 kHz. Copiez les résultats dans les espaces réservés ci-après.



a)  $f=5 \text{ kHz}$



b)  $f=10 \text{ kHz}$



c)  $f=15 \text{ kHz}$

- Comparez les spectres mesurés à l'illustration de la figure 3.
- Quel est environ l'indice de modulation pour chaque fréquence mesurée du signal modulant ?

$m_f(5\text{kHz})=\dots\dots\dots / m_f(10\text{kHz})=\dots\dots\dots / m_f(15 \text{ kHz})=\dots\dots\dots$

**5-4/ Indice de modulation**

Au cours de cette expérience, vous allez étudier l'influence de l'amplitude et de la fréquence du signal modulant sur l'indice de modulation par des mesures réalisées avec l'oscilloscope (domaine temporel). Vous pouvez reprendre le montage de l'expérience précédente. Avec le générateur de fonctions, réglez un signal rectangulaire d'une fréquence de 10 kHz et d'une amplitude de  $2 V_{SS}$ .

➤ Modifiez l'amplitude du signal BF en :

- ✓ la réduisant lentement.
- ✓ l'augmentant lentement.

Observez les modifications du signal FM à l'oscilloscope. Commenter.

➤ Ensuite, modifiez la fréquence du signal BF en :

- ✓ la réduisant lentement.
- ✓ l'augmentant lentement.

Observez les modifications du signal FM à l'oscilloscope. Commenter.

➤ Maintenant modifiez :

- ✓ l'amplitude du signal BF en la réduisant lentement
- ✓ la fréquence du signal BF en l'augmentant lentement.

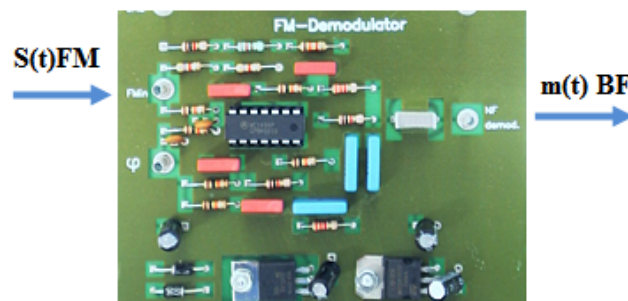
Comment se modifie le signal à la sortie du modulateur ? Calculer l'indice de modulation dans ce cas.

Quelle est l'influence de la déviation de fréquence et de la fréquence de modulation sur l'indice de modulation ?

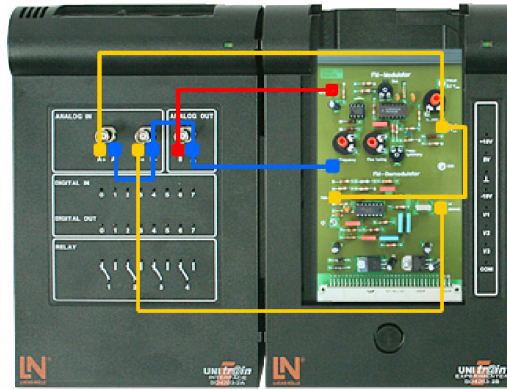
### **5-5/ Démodulation FM**

Au cours de cette expérience, vous allez étudier la récupération du signal modulant à partir d'un signal modulé en fréquence et faire connaissance avec le démodulateurs non cohérents ou le discriminateurs.

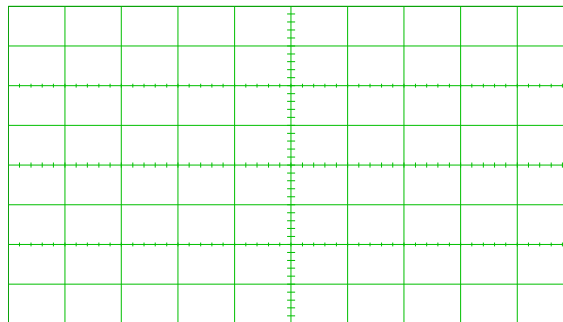
La figure suivante représente le discriminateurs FM. Rappeler brièvement son principe fonctionnement.



Montez le circuit d'expérimentation suivant.



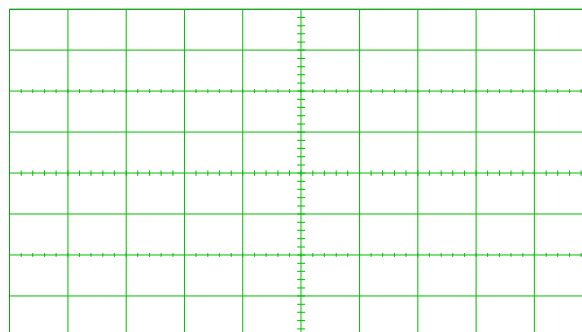
À présent, avec le générateur de fonctions, réglez un signal d'une fréquence de 5 kHz et d'une amplitude de  $2 V_{SS}$ . Avec le canal A de l'oscilloscope, mesurez le signal à la sortie du modulateur et, avec le canal B, le signal à la sortie du démodulateur. Copiez le résultat dans le champ ci-après.



*Signal FM au point de mesure « FMout »*

- Décrivez le signal de sortie du modulateur.
- Comparez le signal à la sortie du démodulateur avec le signal BF alimenté. Justifiez.
- Quelles mesures devrait-on prendre pour améliorer la qualité du signal à la sortie du démodulateur ?

Avec le même réglage du générateur de fonctions, mesurez à présent avec le canal B de l'oscilloscope le signal au point de mesure «  $\phi$  » du démodulateur en comparaison avec le signal à l'entrée du démodulateur. Copiez le résultat dans le champ ci-après.



*Signal FM au point de mesure « FMout »*

- Décrivez le signal mesuré au point de mesure  $\phi$  du démodulateur.
- Que représente ce signal par rapport au signal FM?

### **6-Conclusion générale**

- Conclure sur la modulation FM et les paramètres influant sur le fonctionnement.
- Comparer cette modulation avec la modulation AM.

# TP N°05 : Modulation Analogique d'Impulsion

**PAM**  
PULSE AMPLITUDE MODULATION



## **1/ Introduction:**

les modulations analogiques d'impulsion, sont directement associées aux techniques d'échantillonnages. Selon leur type elles peuvent offrir des propriétés comparable aux techniques de modulations non linéaires en terme d'immunité aux bruits, et surtout donner la possibilité d'utiliser la technique de multiplexage temporel et de modulation de l'émetteur en "tout ou rien" et économiser ainsi de l'énergie. c'est pourquoi on les utilise encore avec comme avantages principaux en télécommunication.

Ce TP offre des connaissances fondamentales sur la modulation par impulsions en amplitude MIA qui joue un rôle prépondérant lors de la transmission numérique de signaux analogiques. Le fonctionnement des procédés sera élaboré à l'aide de nombreuses expériences.

## **2/ Objectifs**

- Fonctionnement de la modulation MIA
- Spectre d'un signal MIA
- Démodulation MIA
- Procédé de multiplexage temporel

### 3/ Rappel théorique

Lors de la modulation par impulsions, un signal analogique est transformé en une séquence de signaux à temps discret constituée de différentes impulsions individuelles. Ce signal porteur en forme d'impulsion est modulé par le signal d'information analogique. La MIA est la première étape à la modulation par impulsions.

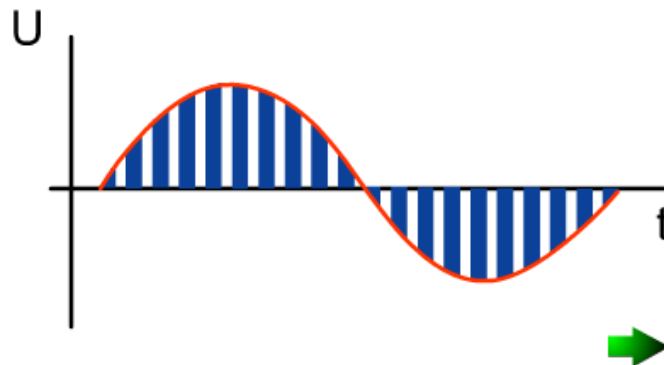


figure 1: signal PAM

La MIA correspond en fait à l'échantillonnage du signal avec maintien ou pas. En peut en effet considérer l'opération d'échantillonnage comme une modulation par le signal porteur du train d'impulsion servant à effectuer l'échantillonnage.

Le train d'impulsion provenant du générateur d'impulsion constitue le signal d'échantillonnage qui détermine quand et durant combien de temps le signal primaire est échantillonné. Le signal résultant est le signal MIA.

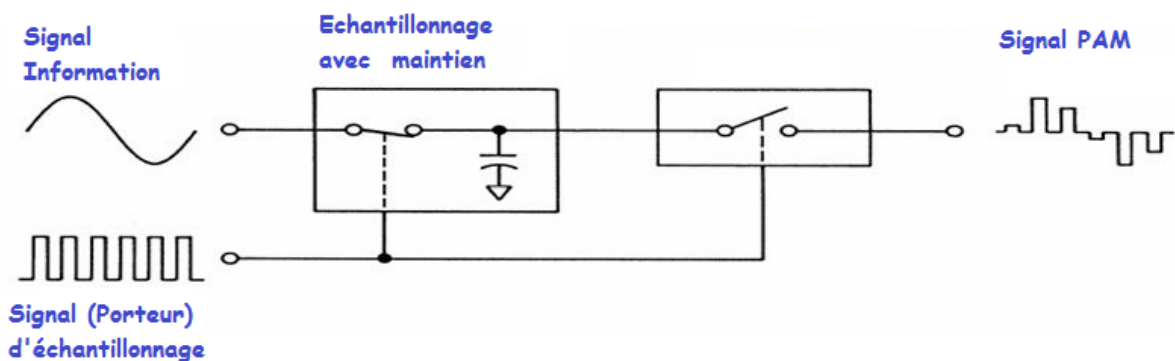


figure 2: Schéma de principe d'un modulateur MIA.

L'opération de démodulation est basé sur le circuit d'échantillonnage avec maintien qui reçoit le signal MIA et un signal d'échantillonnage impérativement synchronisé avec ses impulsions, sans synchronisation le signal reconstitué serait nul. Le signal MIA est transformé en un signal en escalier. Chaque intervalle représente l'amplitude instantané du signal primaire à une période d'échantillonnage, sans retour à zéro comme pour le signal MIA. Le non retour à zéro

durant les périodes d'échantillonnage permet à l'amplitude du signal reconstitué après filtrage passe bas, d'être presque égale à celle du signal primaire.

Le spectre du signal module MIA est le spectre périodique classique du signal échantillonné.

Dans la technique de l'information, le procédé de multiplexage temporel permet un usage multiple de la voie de transmission. Comme la MIA entraîne de larges espaces entre les impulsions modulées, dans le cas du multiplexage temporel, on insère dans ces intervalles de temps des impulsions qui sont modulées avec d'autres signaux d'information.

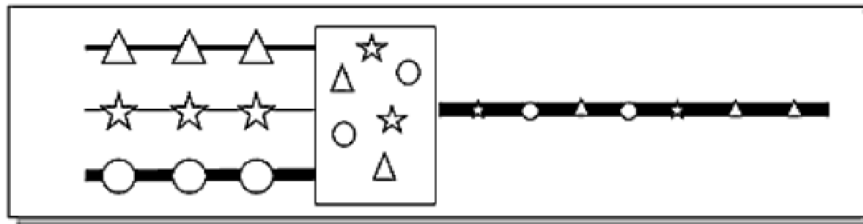


figure 3: exemple de multiplexage

Un multiplexage synchrone dans le modulateur et dans le démodulateur ainsi qu'un intervalle de temps entre les impulsions d'échantillonnage des différents canaux garantissent que les différents canaux ne s'influencent pas mutuellement et sont séparés proprement lors de la démodulation.

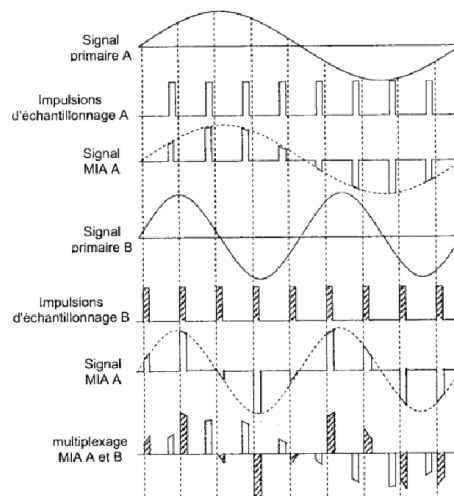


figure 4: opération de modulation et multiplexage pour 2 voix

Dans la vie quotidienne, l'emploi le plus connu du procédé de multiplexage temporel dont nous nous servons tous les jours est la téléphonie. En Europe, on utilise le système PCM 30 (standard : ITU-T G.732) standardisé à l'échelle internationale par l'UIT (Union Internationale des Télécommunications) qui permet de transmettre simultanément trente canaux de télécommunication. L'équivalent en Amérique du Nord est le système PCM 24 (ITU-T G.733) qui gère la transmission de vingt-quatre canaux.



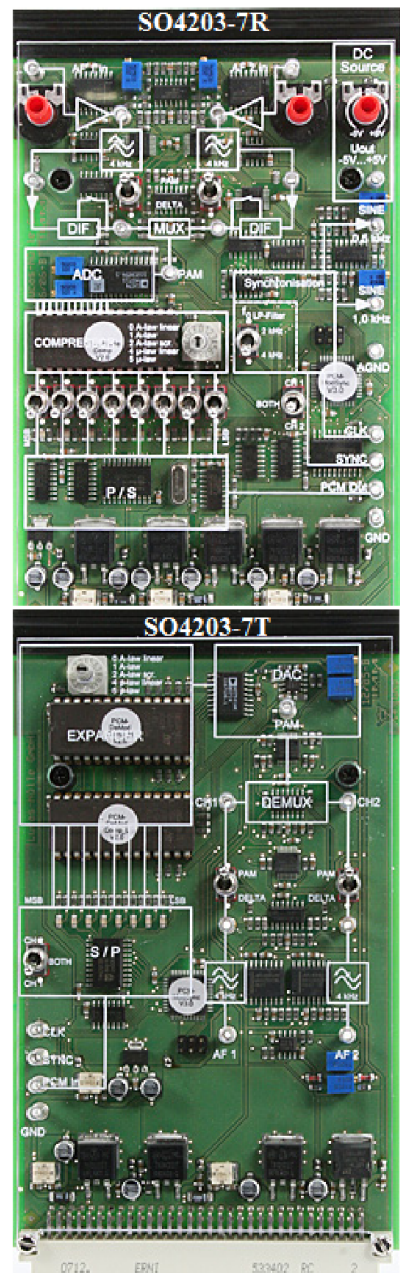
#### 4/ Matériels:

##### **Carte UniTrain-I « Modulateur PAM/PCM»**

La carte d'expérimentation Modulateur PAM/PCM SO4203-7R permet de réaliser deux entrées analogiques en multiplexage temporel sur une voie de transmission. Les signaux analogiques peuvent être démodulés MIA, MIC et Delta. En outre, les signaux peuvent être compressés-étendus avec différentes caractéristiques.

##### **Carte UniTrain-I « Démodulateur PAM/PCM»**

La carte d'expérimentation Démodulateur PAM/PCM SO4203-7T permet de reconstituer les signaux modulés numériquement avec la carte d'expérimentation Modulateur PAM/PCM.



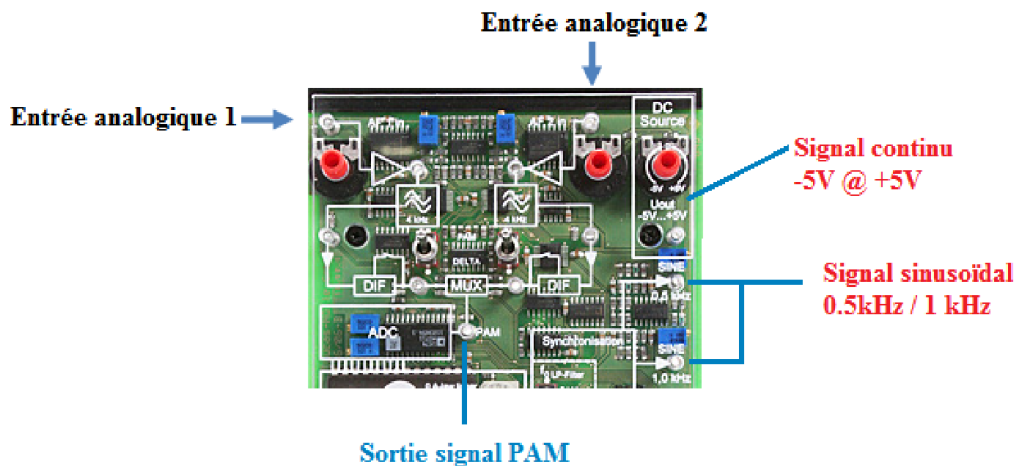
## 5/ Manipulation

### 5-1/Principe de la modulation MIA

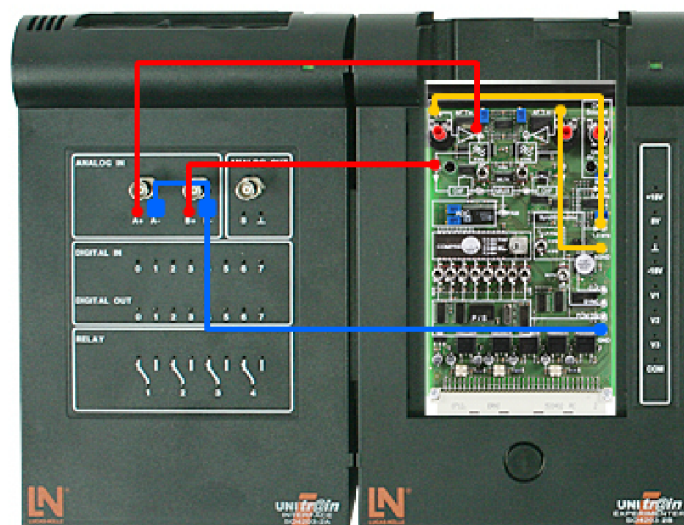
#### A/ modulation d'un signal sinusoïdal

Au cours de cette expérience, vous allez mesurer et comparer un signal sinusoïdal à la sortie de l'amplificateur et les signaux à la sortie de l'élément d'échantillonnage et de maintien et du modulateur MIA.

Le Circuit ci-dessous, présente un modulateur PAM

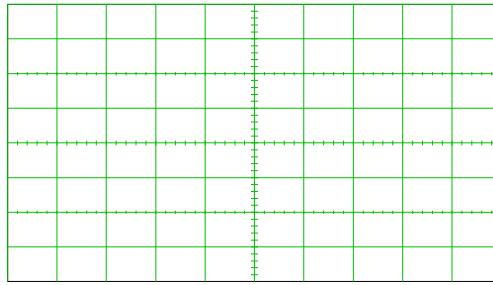


Câbler les différents composants afin de réaliser le montage suivant



- Avec le régulateur d'amplification, réglez pour le canal 1 de la voie de transmission MIA une amplitude du signal sinusoïdal 0.5kHz d'environ 3...4 Vcc.
- Avec le canal A de l'oscilloscope bicanal, mesurez le signal d'entrée en aval de l'amplificateur et, avec le canal B, les signaux en aval de l'élément d'échantillonnage et de maintien.

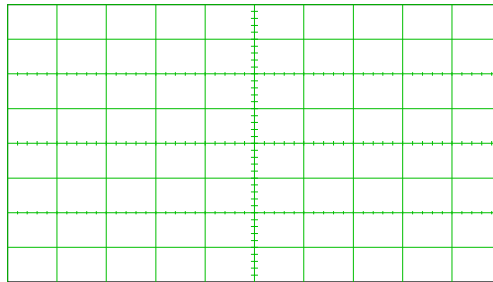
Pour l'évaluation, superposez les deux signaux sur l'oscillogramme et copiez les résultats dans les champs ci-après.



*Signal d'entrée et signal à la sortie de l'élément d'échantillonnage et de maintien*

- ✓ Décrivez le signal mesuré sur l'élément d'échantillonnage et de maintien.
- ✓ Combien de d'échantillon dans une période
- ✓ Quelle est alors la fréquence d'échantillonnage ?
- ✓ D'après le théorème de Shannon, quelle peut être la fréquence maximale du signal échantillonné pour cette fréquence d'échantillonnage ?

➤ Maintenant avec le canal B de l'oscilloscope, mesurez le signal à la sortie PAM.

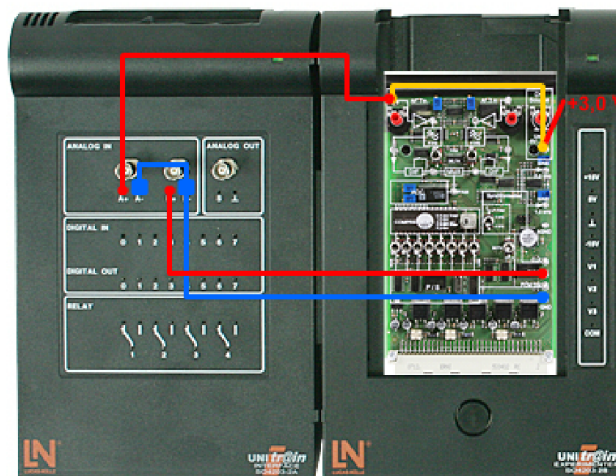


*Signal d'entrée et signal à la sortie « PAM »*

- ✓ Décrivez le signal MIA.
- ✓ Comment se forme un signal MIA.

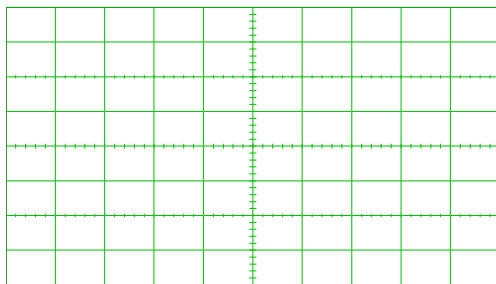
B/ modulation d'un signal continu

Au cours de cette expérience, vous allez étudier l'allure d'un signal de tension continue MIA. Avec le même circuit modulateur PAM, montez le circuit d'expérimentation suivant :

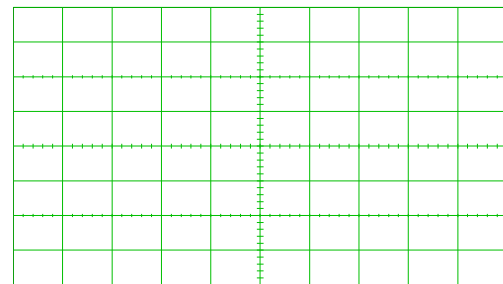


➤ Avec le potentiomètre de la source de tension continue sur la carte d'expérimentation et à l'aide du voltmètre, réglez une tension continue d'environ +3,0 V.

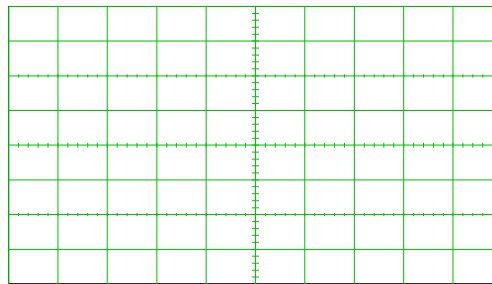
- Réglez l'amplification du canal 1 sur 1 (butée gauche).
- Avec le canal A de l'oscilloscope, représentez les impulsions de synchronisation à la sortie « SYNC ». Pour obtenir un meilleur déclenchement, réglez le point de déclenchement à 50% de l'amplitude des impulsions.
- Avec le canal B de l'oscilloscope, mesurez les tensions de sortie :
  - à la sortie de l'amplificateur
  - à la sortie de l'élément d'échantillonnage et de maintien
  - à la sortie « PAM ».
- Copiez les résultats dans les champs ci-dessous.



*la sortie de l'amplificateur*



*la sortie de l'élément d'échantillonnage*



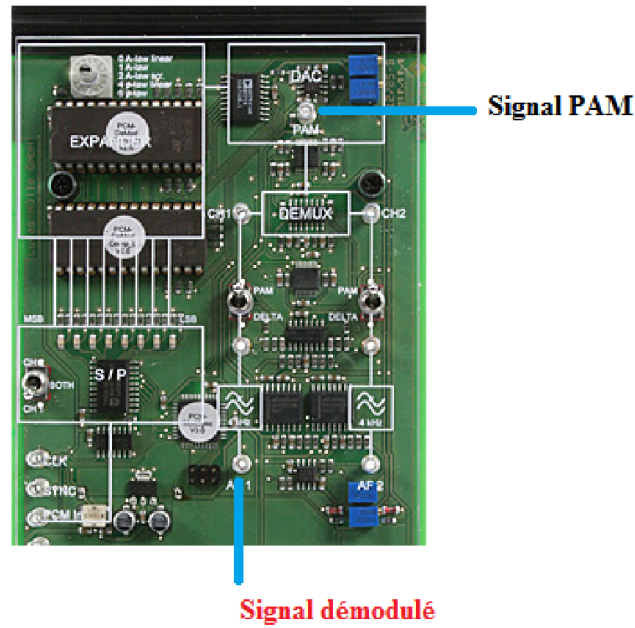
*la sortie « PAM »*

- ✓ À quelle fréquence le signal est-il échantillonné ?
- ✓ Conclure sur la formation d'un signal MIA

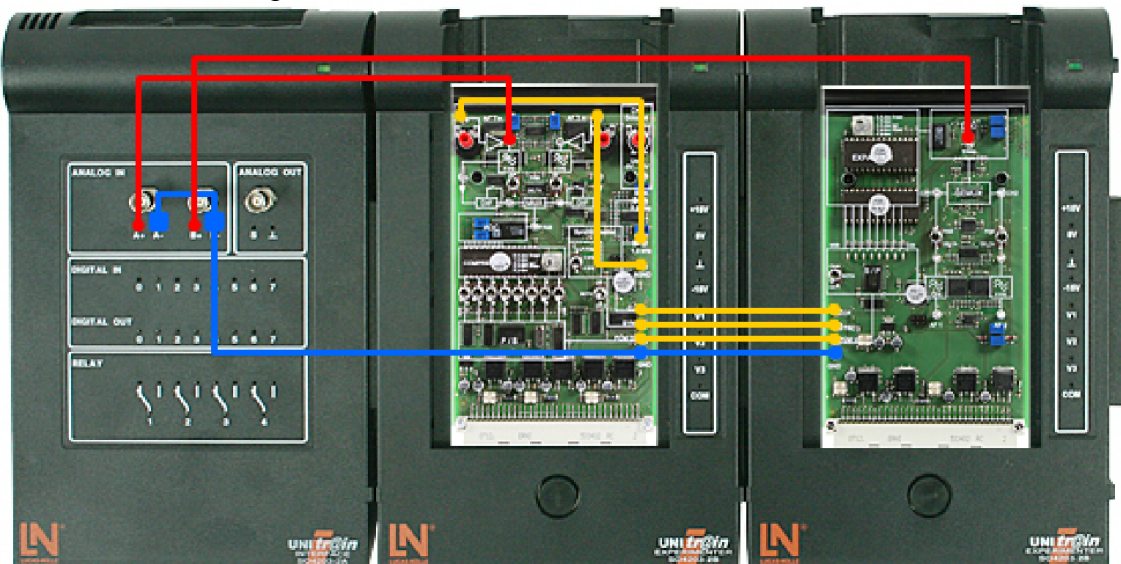
## **5-2/ Démodulation**

### A/ Démodulation d'un signal sinusoïdal

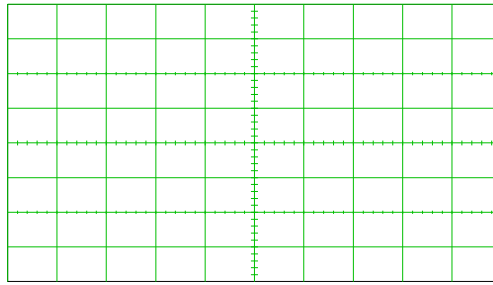
Au cours de cette expérience, vous allez étudier l'allure d'un signal sinusoïdal MIA à l'entrée du démodulateur et après la démodulation. Le Circuit ci-dessous, présente un démodulateur PAM.



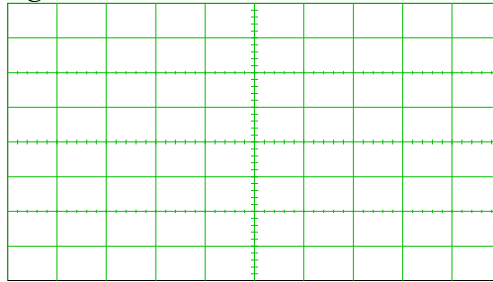
Montez le circuit d'expérimentation suivant :



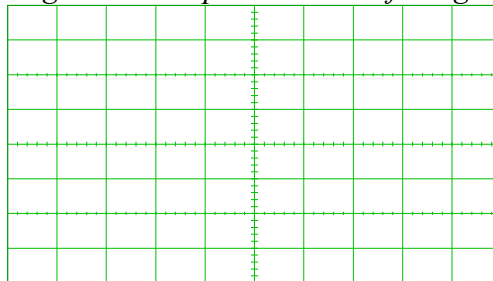
- Avec le régulateur d'amplification, réglez pour le canal 1 de la voie de transmission MIA une amplitude du signal sinusoïdal d'environ 3...4 V<sub>ss</sub>.
- Avec le canal A de l'oscilloscope bicanal, mesurez le signal information à l'entrée analogique 1 du modulateur MIA/MIC.
- Avec le canal B de l'oscilloscope, mesurez les tensions de sortie :
  - à la sortie « PAM » sur le démodulateur .
  - à la sortie du démultiplexeur.
  - à la sortie après filtrage



*Signal MIA / MIC sur le démodulateur*



*Signal démultiplexé avant le filtrage*



*Signal de sortie après filtrage*

- ✓ Qu'avez-vous observé ?
- ✓ Comparer le signal information d'origine avec le signal reconstitué ?
- ✓ Quelles sont les étapes de reconstitution de l'information

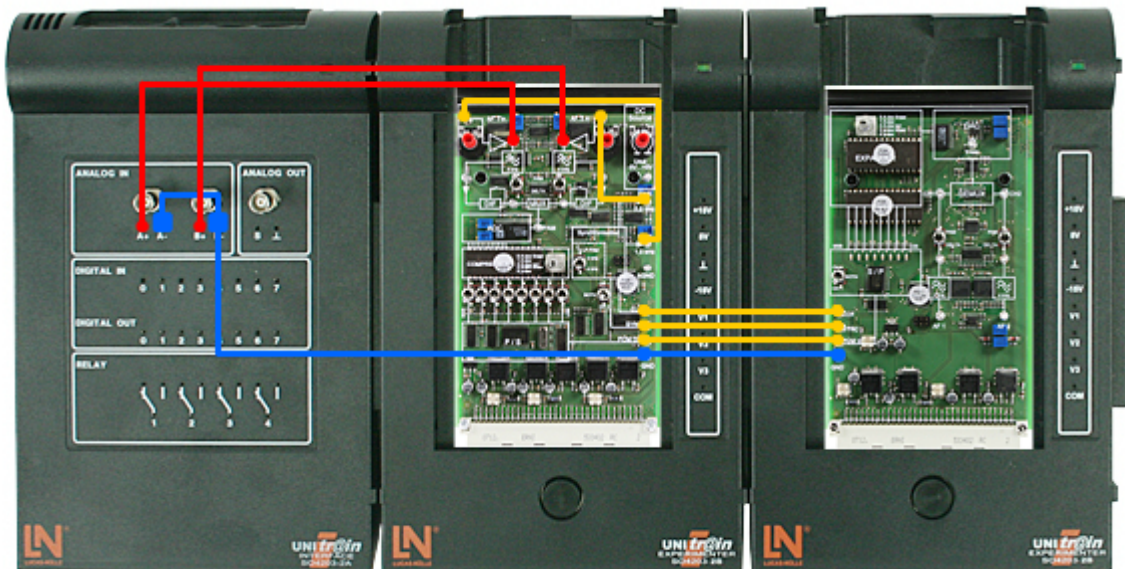
B/ démodulation d'un signal continu

Répéter les mêmes étapes pour un signal sinusoïdale sauf à l'entrée vous utilisez une tension continue de 3V. Conclure à la fin sur l'opération de démodulation d'un signal PAM.

**5-3/ Multiplexage temporel**

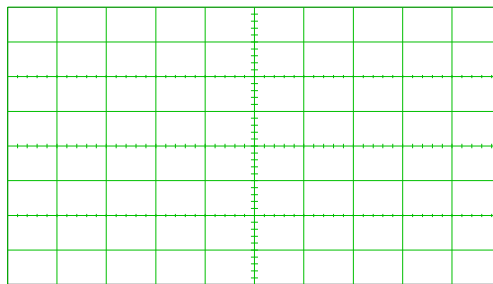
Au cours de cette expérience, vous allez étudier l'allure de deux signaux sinusoïdaux MIA dans le multiplexage temporel. Vous allez suivre l'évolution dans le temps des signaux sur une voie MIA.

Montez le circuit d'expérimentation suivant :



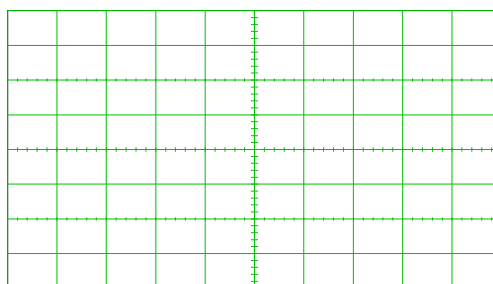
A/ Mesure sur le modulateur

- Avec le régulateur d'amplification, réglez pour les canaux 1 et 2 de la voie de transmission MIA une amplitude du signal sinusoïdal à la sortie du filtre passe-bas d'environ 3...4 Vss.
- Avec le canal A de l'oscilloscope bicanal, mesurez d'abord le signal initial du canal 1 et, avec le canal B, le signal initial du canal 2.



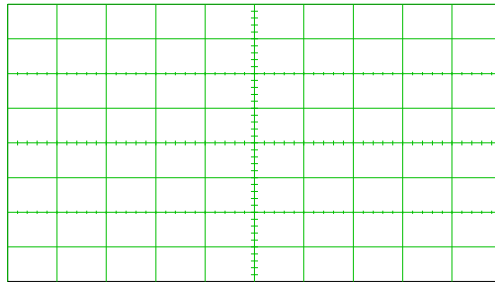
*Signaux d'entrée des canaux 1 et 2*

- À présent, mesurez les signaux échantillonnés des canaux 1 et 2 sur les bornes « S&H » et copiez le résultat dans le champ ci-dessous



*Signaux des canaux 1 et 2 après l'échantillonnage*

- ✓ Comment a lieu l'échantillonnage des deux canaux ?
- Ensuite, avec le canal A de l'oscilloscope, mesurez le signal multiplexé à la sortie MIA en laissant le canal B de l'oscilloscope sur la borne « S&H ».



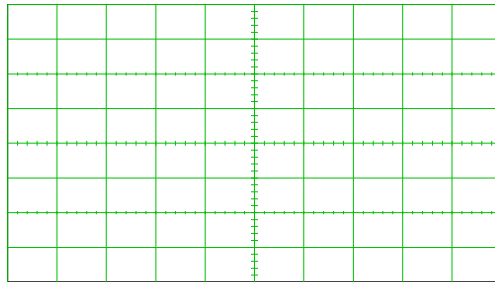
*Signal MIA bicanal en mode de multiplexage temporel*

- ✓ Décrivez la courbe du signal multiplexé.

B/ Mesure des signaux démodulés

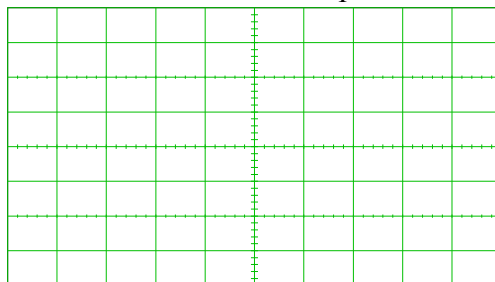
Avec l'oscilloscope du démodulateur, mesurez les signaux

- Démultiplexés et maintenus aux points de mesure CH1 et CH2



*Signaux démultiplexés avant le filtrage*

- Les signaux de sortie filtrés des canaux 1 et 2 aux points AF1 et AF2.



*Signaux de sortie des canaux 1 et 2*

- ✓ Que se passe-t-il lors de la démodulation des signaux ?
- ✓ À quoi sert le passe-bas à la fin de la démodulation ?
- ✓ Modifiez l'amplification aux entrées du modulateur. Quel effet observez-vous sur les signaux démodulés ?
- ✓ Décrire le procédé de multiplexage temporel

**6/ Conclusion générale**

- Conclure sur l'opération de modulation MIA.
- Parler de la place du multiplexage temporel dans la transmission des données.



# Bibliographie

1. Cours UniTrain-I Auteur : Lucas-Nülle GmbH
  - Télécommunication 1 : Quadripôles et filtres
  - Télécommunication 5 : Procédés de modulation MIA, MIC et codage de ligne
  - Télécommunication 8 : Procédés de modulation analogiques AM et FM
2. Technical Training and Education K and H MFG. CO., LTD
  - Basic Communication Trainer KL-900A
3. A.P. Malvino, « Principes d'électronique », 6 édition, Sciences-Sup, Dunod
4. P. Rochette, « Les fondamentaux en Electronique », Technosup, Ellipses.
5. H. H. Ouslimani, A. Ouslimani, “Fonctions principales d’électronique », Casteilla, 2010.
6. J. M. Poitevin, « Electronique : Fonctions principales », Dunod, 2003.