

Le quartz dans les oscillateurs et les filtres

Application en télécommunications

Temps de préparation : 2h15mn
Temps de présentation devant le jury : 10 mn
Entretien avec le jury : 10 mn

Guide pour le candidat

Le dossier ci-joint comporte un article de 12 pages.

Répartition possible du temps de préparation

- 30 mn au début pour une lecture "rapide" du dossier;
- 60 mn, d'une part, pour analyser le fonctionnement du quartz et ses avantages dans les oscillateurs et les filtres et, d'autre part, pour comprendre le récepteur superhétérodyne ;
- le reste du temps pour la préparation de l'exposé devant le jury (incluant la préparation éventuelle de transparents).

Travail demandé au candidat

Le candidat devra :

- exposer le principe du quartz
- établir des comparaisons, à partir des figures du dossier, entre les montages avec ou sans quartz et justifier l'intérêt du quartz
- expliquer le principe de modulation d'amplitude et comment recevoir différentes stations radio

Questions possibles pour le candidat

1. En utilisant vos connaissances en automatique, justifier la relation : $A(p).B(p) = -1$
2. En vous appuyant sur les diagrammes de Bode de la figure 8, calculer le gain A de l'oscillateur Pierce de la figure 7 pour être en limite de stabilité et avoir des oscillations.
3. A partir de la figure 9, expliquer pourquoi l'oscillateur à quartz a une fréquence d'oscillation très stable.
4. Pour la démodulation synchrone, tracer le spectre du signal modulé multiplié par la porteuse et justifier le choix du filtre.

Le quartz dans les oscillateurs et les filtres

Application en télécommunications

1 - Introduction

Dès l'antiquité, on connaît les pierres de Magnésie qui attire la limaille de fer. Il faut attendre 1780 pour que Coulomb mette en évidence la notion de charges électriques et de force électrostatique à l'aide d'un pendule de torsion. Ceci permet de définir le champ électrique.

En 1820, Oersted découvre les effets magnétiques du courant électrique avec le déplacement d'une aiguille aimantée près d'un fil parcouru par un courant électrique. Biot et Savart énoncent la loi relative au phénomène et Ampère en établit la théorie.

En 1831, Faraday découvre l'induction électromagnétique qui consiste en la création d'un courant électrique par le déplacement d'un circuit dans un champ magnétique permanent, par la présence d'un circuit fixe dans un champ magnétique variable ou bien par une combinaison des deux phénomènes.

Ces travaux fondamentaux sont suivis par la mise en évidence des pertes résistives par Joule, de l'essor du télégraphe par Morse en 1844 et de l'énoncé de la théorie des circuits oscillants par Lord Kelvin en 1853.

Maxwell réalise ensuite une étude qui unifie les propriétés électriques, magnétiques et lumineuses de la matière. Sa démonstration est accueillie en 1865 avec une certaine froideur. Cependant, Hertz confirme cette théorie en 1887 en découvrant les ondes électromagnétiques et en montrant qu'elles possèdent toutes les propriétés de la lumière.

Entre 1876 et 1893, Heaviside met au point le modèle de ligne de transmission à constantes distribuées. Dans le même temps, Bell met au point les premiers systèmes de transmission de voix sur des lignes électriques d'environ 3 kilomètres : c'est l'apparition du téléphone.

Dès lors, les applications des ondes électromagnétiques, guidées dans une ligne ou non, se multiplient :

- réception de signaux radio par Branly en 1890
- antenne radio par Popov en 1896
- transmission à longue distance par Marconi en 1899
- premiers filtres par Campbell et Wagner en 1915
- premier récepteur radio hétérodyne par Levy et Amstrong en 1918
- première communication intercontinentale en ondes courtes par Marconi en 1925
- téléphonie

L'effort technologique entre deux guerres permet l'essor du radar, du magnétron et du klystron (tubes à vide générateurs ou amplificateurs de courant hyperfréquences). En 1948 est inventé le premier transistor et ce n'est qu'en 1962 qu'est lancé le premier satellite de télécommunications.

Depuis, à partir des années 1980, le téléphone, la radio, la télévision et les télécommunications ont pris un essor considérable.

L'étude ci-après débute par la présentation d'un composant électronique, le quartz, et de son insertion dans des circuits de télécommunications tels que les oscillateurs et les filtres. Puis, il vous est proposé de découvrir un montage déjà ancien mais illustratif des principes fondamentaux utilisés en télécommunications : le récepteur superhétérodyne en modulation d'amplitude.

2 - Le quartz en oscillateur et en filtre

2.1 - Le quartz : composition et modélisation

Le quartz est composé de silice SiO_2 qui est une matière minérale extrêmement répandue dans la nature. C'est un matériau très dur et qui sera donc difficile à travailler, ceci expliquant en partie le prix à payer pour un quartz fait "sur mesure".



Figure 1 - Le quartz

Le quartz présente la particularité d'être piézo-électrique, en d'autres termes cela signifie que si on applique une force de compression sur ses faces, on constate l'apparition de charges électriques. Si maintenant on inverse l'effort que l'on applique sur la lamelle de quartz et qu'au lieu de compresser celui-ci on exerce une traction, on constate que le signe des charges s'inverse. Plus l'effort mécanique est important, plus il y a de charges qui apparaissent. Mais l'effet piézo-électrique ne s'arrête pas là, il est réversible, c'est-à-dire qu'en appliquant une tension électrique sur la lamelle

de quartz, on observe une déformation mécanique. Le quartz est un matériau élastique (toutes choses égales par ailleurs) et il retrouve sa forme originelle dès que cesse la tension. Ceci est important puisque cela dicte la fréquence propre de résonance qui est liée, entre autres, aux dimensions physiques de la lamelle de quartz.

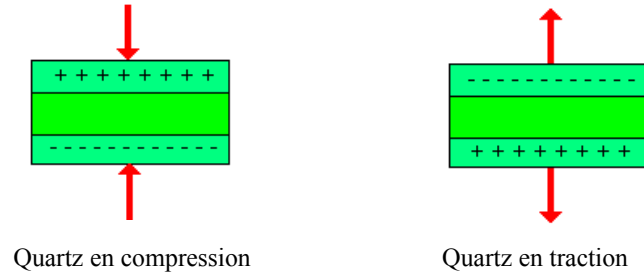


Figure 2 - Le comportement piézo-électrique du quartz

La tension appliquée sur le quartz permet d'en exciter la structure mécanique. Les déformées engendrées prennent une grande amplitude à certaines fréquences : on a alors apparition d'une onde stationnaire. Une lame de quartz présente ainsi différents modes de résonance fonction de sa géométrie. La figure 3 montre le premier mode de flexion d'une lame de quartz.

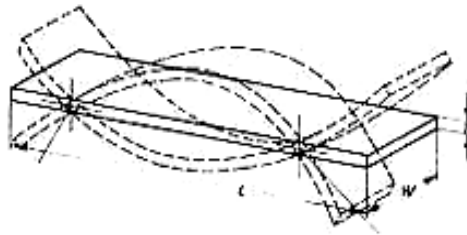


Figure 3 - Résonance en flexion d'une lame de quartz

Sur le plan électrique, le quartz est symbolisé par la figure 4. La lamelle de quartz est reliée grâce à deux électrodes de connexion. Les connexions notées A et B vont constituer une capacité appelée capacité de connexion. Le schéma électrique équivalent d'un quartz est un circuit série shunté par la capacité de connexion. Les valeurs de L, R et C1 sont dictées par la nature et les caractéristiques du quartz. Ce sont des équivalents électriques d'éléments mécaniques. On les appelle pour cette raison des éléments motionnels. Par exemple, la résistance R représente les pertes du système équivalentes aux frottements mécaniques. Les valeurs numériques de ces grandeurs ne sont pas des ordres de grandeurs usuels (voir tableau 1). On constate que le coefficient de qualité

$Q = \frac{1}{RC_1\omega_0}$ est beaucoup plus élevé que celui-ci d'un résonateur usuel : les pertes sont, en valeurs relatives, plus faibles dans un quartz que dans un circuit électrique ordinaire.

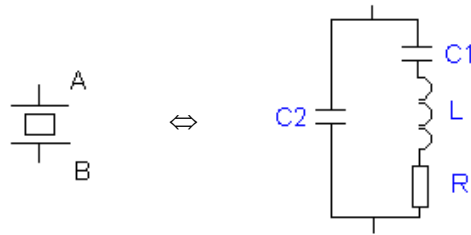


Figure 4 - Symbole et modèle électrique du quartz

Fréquence de résonance f_0	L(H)	C1(10^{-15} F)	R(Ω)	C2(10^{-12} F)	Q
32 768 Hz	7860	3	32 000	1.5	50 000
100 KHz	50	50	400	8	80 000
1 MHz	4	6	240	3	110 000
10 Mhz	0.01	30	5	8	100 000

Tableau 1 - Valeurs des grandeurs du modèle électrique du quartz

Le comportement électrique du quartz peut être déterminé en appliquant à un quartz une tension alternative sinusoïdale dont on fait varier la fréquence et en mesurant l'impédance du quartz pour chaque fréquence. On obtient la figure 5 pour un quartz de fréquence de résonance 100 kHz :

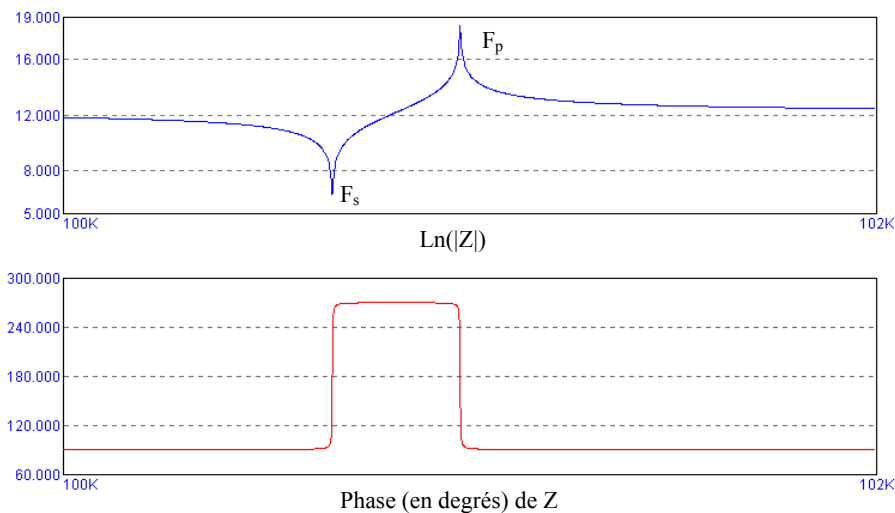


Figure 5 - Impédance d'un quartz de 100 kHz

On reconnaît la réaction d'un circuit série pour une fréquence donnée et d'un circuit parallèle pour une fréquence légèrement supérieure. Quand on approche de la résonance série (F_s), l'impédance passe par un minimum équivalent sensiblement à R, puis remonte rapidement vers un maximum à la fréquence parallèle (F_p). Ces deux fréquences sont les fréquences de résonance du quartz.

2.2 - Le quartz dans les oscillateurs

Un oscillateur est un circuit générant un signal périodique en l'absence de toute excitation extérieure. Un moyen simple d'obtenir un oscillateur sinusoïdal de tension est d'utiliser une boucle de réaction avec une entrée nulle (Figure 6). Une cellule de réaction permet d'assurer l'instabilité (à la fréquence de résonance de l'oscillateur) de l'ensemble si le gain de l'amplificateur est tel que :

$$A(p).B(p) = -1.$$

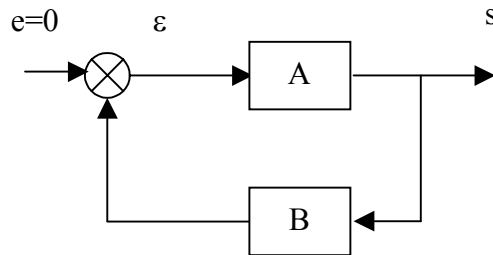


Figure 6 - boucle de réaction

Un exemple d'oscillateur et sa réponse en fréquence sont donnés par les figures 7 et 8. La figure 8 permet de déterminer la fréquence d'oscillation et de calculer le gain A pour obtenir ces oscillations.

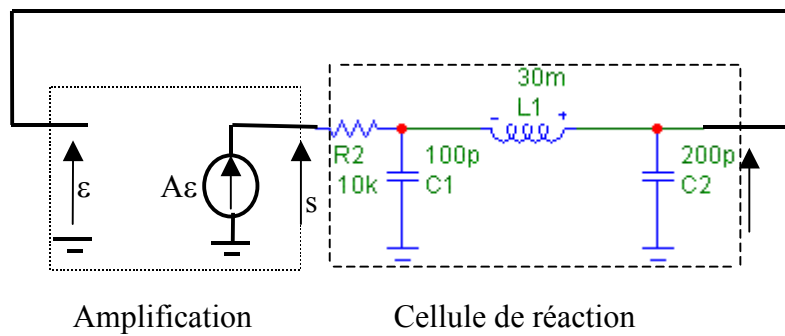


Figure 7 - Oscillateur Pierce

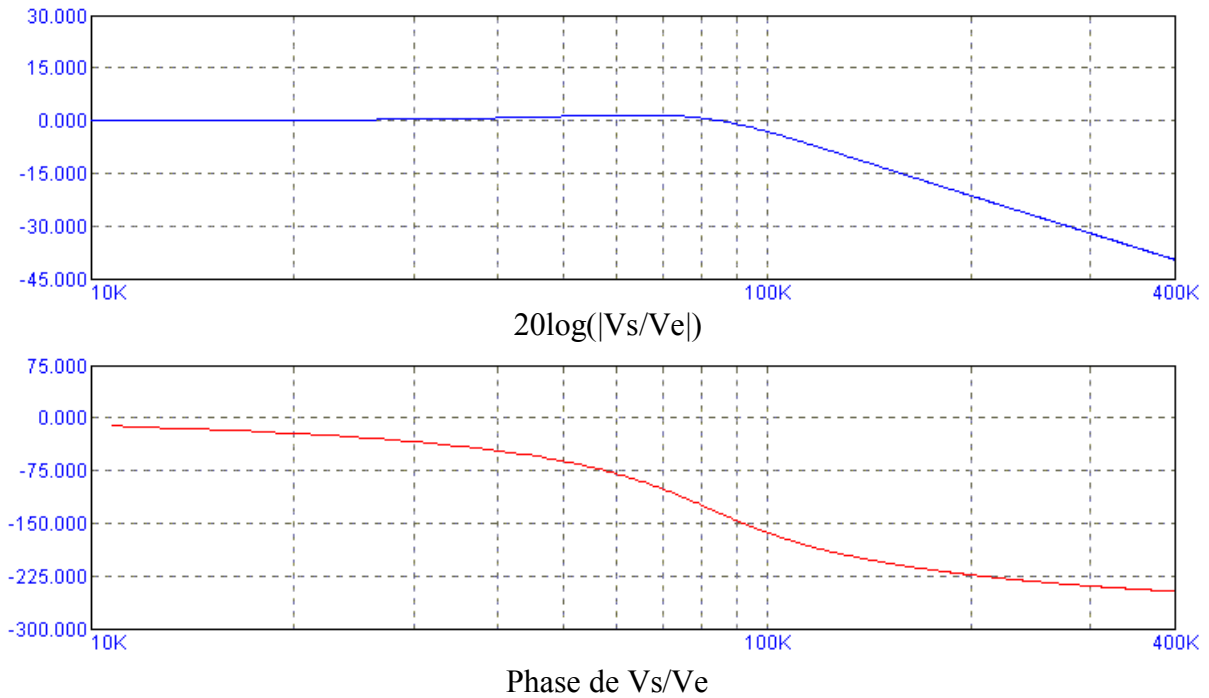


Figure 8 - Fonction de transfert de la cellule de réaction

On peut également remplacer l'inductance de la cellule de réaction précédente par un quartz. On obtient alors une variation de phase bien plus rapide (l'échelle de fréquence est comprise ici entre 100 et 102 kHz) (Figure 9).

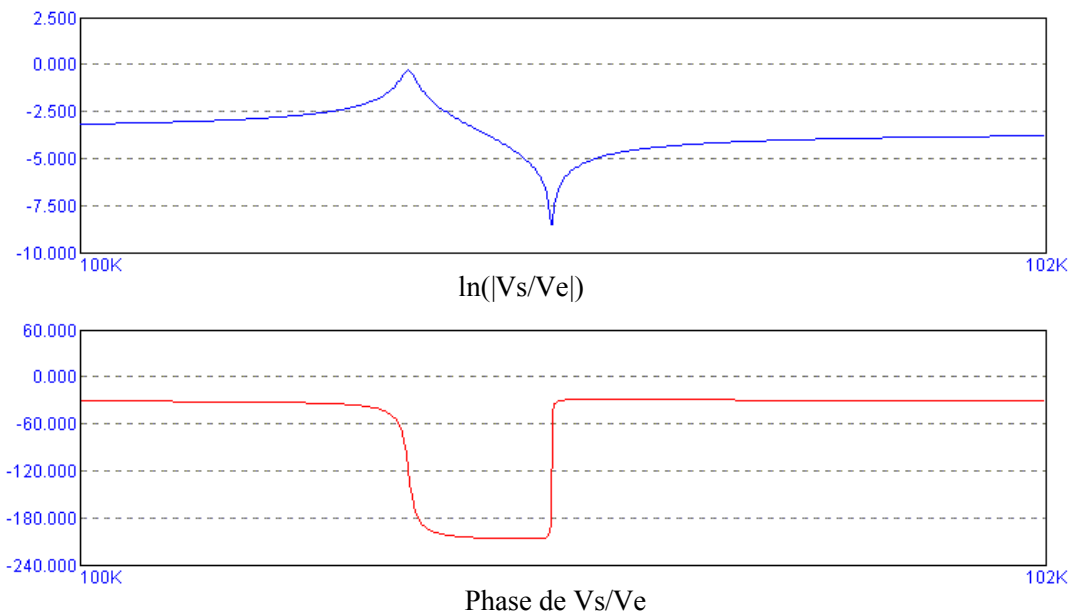


Figure 9 - Fonction de transfert de la cellule de réaction avec quartz

Du fait de son Q très élevé et de sa stabilité, le quartz va permettre de contrôler très précisément la fréquence d'oscillation. Dès que l'on aura besoin d'une fréquence stable, on aura recours au quartz.

2.3 - Le quartz dans les filtres

Les quartz permettent également de réaliser des filtres passifs très sélectifs. Un filtre à quartz est composé d'une suite de quartz dans le but de réduire la bande passante à la valeur souhaitée (Figures 10 et 11). Le filtre étroit à quartz est un ensemble indispensable ou presque. Pour les filtres à quartz, les valeurs sont normalisées tant pour ce qui concerne la bande passante que la fréquence d'utilisation. On trouvera essentiellement du 455 KHz (plutôt filtre céramique que quartz), du 9 MHz, du 10,7 MHz.

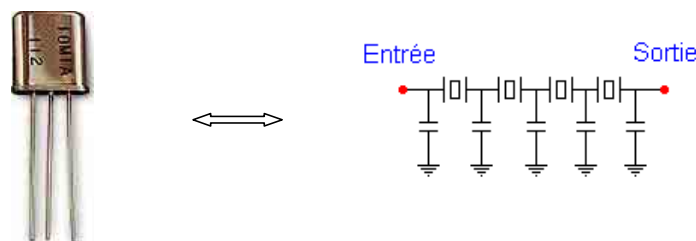


Figure 10 - Composition d'un filtre à quartz

Le tracé des diagrammes de Bode du schéma de la figure 10 est représenté figure 11.

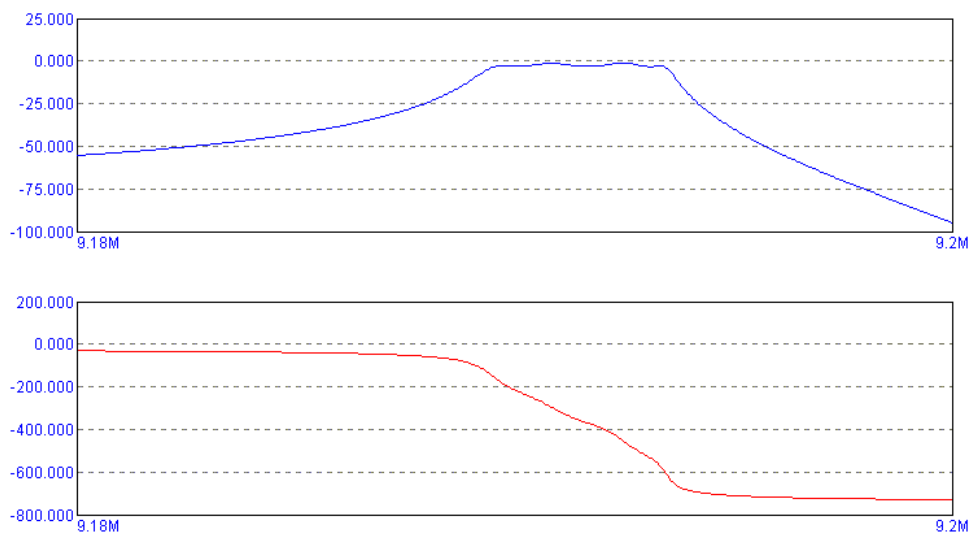


Figure 11- Fonction de transfert du filtre à quartz

3 - Application en télécommunications

3.1 - Présentation du problème

Un émetteur A émet par onde électromagnétique (voie hertzienne) un message destiné au récepteur B.

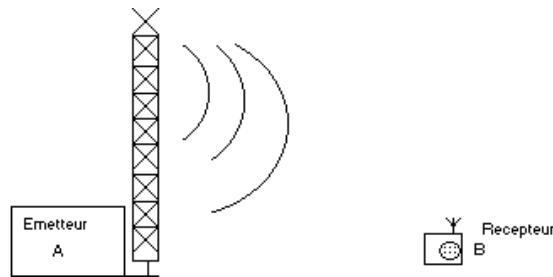


Figure 12 - Le problème de télécommunication

Le message à transmettre à une fréquence comprise entre 20 Hz (basses) et 10 kHz (aigus). Si le message était transmis directement par voie électromagnétique, la portée serait très faible et l'antenne très grande. D'autre part, il y a en général plusieurs émetteurs au voisinage du récepteur. Le récepteur capterait en même temps aussi bien le message de l'émetteur A qu'un message d'un autre émetteur sans pouvoir les séparer. Pour résoudre ces problèmes, on utilise une onde électromagnétique de haute fréquence, appelée porteuse, qui transporte le message. Il suffit, alors, de n'accorder le récepteur que sur la porteuse du message.

Le signal transmis qui est une composition du message à envoyer et de la porteuse est obtenu suite à une opération appelée modulation. Le signal transmis est dit modulé. L'opération qui permet de récupérer le message à partir du signal transmis modulé est appelée démodulation.

Trois solutions sont possibles afin de moduler le message à transmettre :

- on modifie l'amplitude de la porteuse : on parle de modulation d'amplitude.
- on modifie la fréquence de la porteuse : on parle de modulation de fréquence.
- on modifie la phase de la porteuse : c'est de la modulation de fréquence qui est peu différente de la modulation de fréquence.

Seules la modulation d'amplitude et la démodulation d'amplitude seront abordées dans la suite de l'exposé.

3.2 - Principe de la modulation d'amplitude

On n'étudiera que des signaux sinusoïdaux sachant qu'un signal quelconque est une somme de signaux sinusoïdaux.

Le message à transmettre appelé signal modulateur est de la forme :

$$u(t) = U_0 + U_m \cdot \cos(\omega t),$$

où U_0 est une composante continue.

La porteuse est de la forme :

$$v(t) = V_m \cdot \cos(\omega_0 t).$$

La modulation d'amplitude consiste en un mélange des signaux qui se traduit par une multiplication. Le signal modulé a pour expression :

$$s(t) = u(t).v(t),$$

soit :

$$s(t) = [U_0 + U_m \cos(\omega t)].V_m \cos(\omega_0 t)$$

$$s(t) = U_0 [1 + (U_m/U_0) \cos(\omega t)].V_m \cos(\omega_0 t)$$

$$s(t) = A[1 + m \cos(\omega t)].\cos(\omega_0 t),$$

avec $m = U_m / U_0$ taux de modulation et $A = U_0.V_m$.

On peut transformer cette multiplication de deux fonctions sinusoïdales en une somme de fonctions sinusoïdales. On aura donc :

$$s(t) = A \cos(\omega_0 t) + \frac{1}{2} A m \cos[(\omega_0 + \omega)t] + \frac{1}{2} A m \cos[(\omega_0 - \omega)t].$$

Dans ce signal on aura la superposition de trois raies aux fréquences $f_0 - f$, f_0 , $f_0 + f$, ce qui donne le spectre de fréquence de la figure 13.

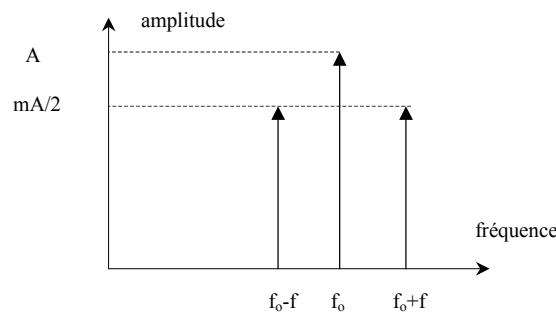


Figure 13 - Spectre de fréquence d'un signal modulé

Remarque : Si U_0 est nul, le signal est modulé sans porteuse et le spectre de fréquence ne comporte plus que deux raies.

Temporellement, le signal modulé a l'allure de la figure 14 pour une modulation avec porteuse et l'allure de la figure 15 pour une modulation sans porteuse.

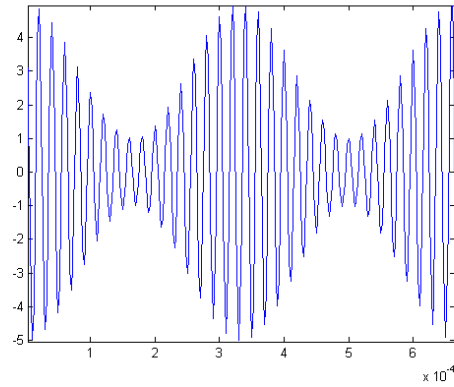


Figure 14 - Signal modulé avec porteuse

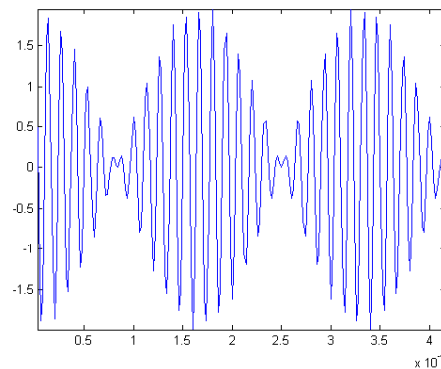


Figure 15 - Signal modulé sans porteuse

3.3 - Principe de la démodulation d'amplitude

Il existe différents moyens de démoduler le signal afin de récupérer le message.

3.3.1 - Démodulation synchrone (ou cohérente)

La démodulation synchrone consiste à multiplier un signal modulé en amplitude par la porteuse qui a servi à générer cette modulation.

Soit le signal modulé :

$$s(t) = A[1 + m \cdot \cos(\omega t)] \cdot \cos(\omega_0 t).$$

Ce signal multiplié par la porteuse s'écrit :

$$y(t) = A[1 + m \cdot \cos(\omega t)] \cdot \cos^2(\omega_0 t).$$

$$y(t) = A[\frac{1}{2} + \frac{1}{2} m \cdot \cos(\omega t) + \frac{1}{2} \cos(2\omega_0 t) + \frac{1}{2} m \cdot \cos(2\omega_0 - \omega)t + \frac{1}{2} m \cdot \cos(2\omega_0 + \omega)t].$$

Afin de récupérer le message, il suffit alors de filtrer avec un filtre passe-bande.

3.3.2 - Démodulation asynchrone (ou non cohérente)

Un exemple simple de démodulation asynchrone est présenté par la figure 16 sous forme de schéma blocs :

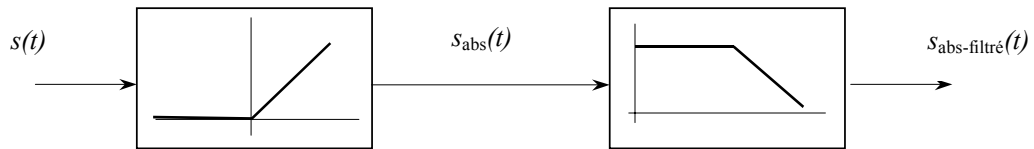


Figure 16 - Principe de la démodulation asynchrone dite simple alternance

En électronique, un circuit RCD permet de faire ce type de démodulation. Il est appelé circuit de détection d'enveloppe (Figure 17). La diode permet de redresser le signal puis la charge et la décharge du condensateur permet le filtrage haute fréquence du signal.

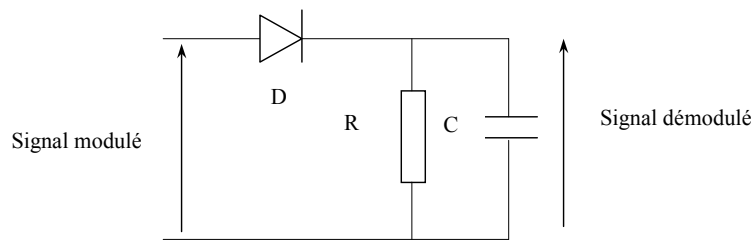


Figure 17 - Circuit détecteur d'enveloppe

Le signal démodulé en sortie du circuit détection d'enveloppe a l'allure de la figure 18. Il peut-être nécessaire de filtrer les composantes résiduelles hautes fréquences et la composante continue.

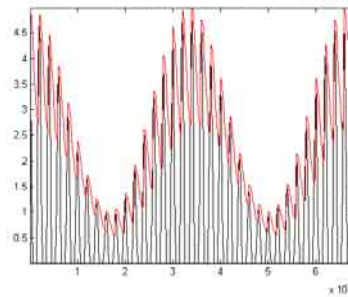


Figure 18 - Sortie du circuit détection d'enveloppe

3.4 - Récepteur superhétérodyne

La figure 19 expose le principe du récepteur superhétérodyne qui permet de sélectionner la fréquence de la porteuse sur laquelle est émis un message et d'effectuer la démodulation nécessaire à l'écoute de ce message.

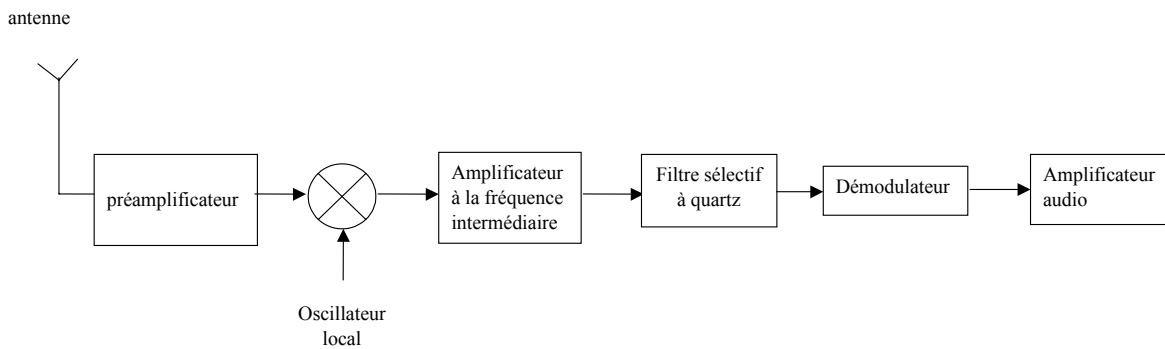


Figure 19 - Principe du récepteur superhétérodyne

Le signal reçu sur l'antenne entre dans le préamplificateur. Puis il est multiplié avec un signal sinusoïdal issu de l'oscillateur local. A la sortie du multiplicateur, le signal est envoyé à un étage d'amplification dit de Fréquence Intermédiaire puis filtré de manière sélective par un filtre à quartz. Enfin le signal est démodulé avant d'être amplifié pour l'écoute.

La fréquence de l'oscillateur local n'est pas choisie au hasard mais doit répondre à un critère bien précis. Il faut faire en sorte qu'après multiplication du signal incident (celui qui arrive sur l'antenne) et du signal de l'oscillateur local, la somme ou la différence des fréquences soit constante et égale à la bande de fréquence filtrée par le quartz.

La Fréquence Intermédiaire est : $FI = 455 \text{ KHz}$.

Le fréquence du signal incident est : $F_s = 945 \text{ KHz}$.

La contrainte est que :

$$F_s + F_{osc} = FI \text{ ou } F_s - F_{osc} = FI$$

Soit

$$F_{osc} = 490 \text{ KHz ou } F_{osc} = 1400 \text{ KHz}$$

Pour changer de station, il suffit donc de faire varier la fréquence de l'oscillateur local. L'avantage est que tous les signaux sont amplifiés et filtrés sur une seule fréquence. On peut donc utiliser un filtre sélectif à fréquence fixe tel que le quartz.

4 - Conclusion

L'étude ci-dessus a permis de découvrir un composant électronique, le quartz, qui permet de réaliser des oscillateurs de précision et des filtres sélectifs. Ce composant peut être utilisé en télécommunications dans un récepteur superhétérodyne en modulation d'amplitude. La modulation d'amplitude se traduit par la composition d'un signal modulé à partir d'un message à émettre et d'une porteuse. Suite à la transmission par ondes hertziennes, le message utile est extrait du signal émis en décomposant le signal modulé. Le rôle du quartz dans cette application est double : il peut être utilisé non seulement pour la génération de la porteuse mais aussi en tant que filtre lors de la démodulation dans le récepteur superhétérodyne.