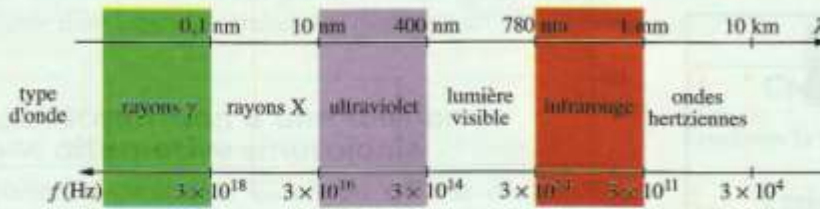


1. La transmission des informations

Il est possible actuellement de communiquer de manière quasiment instantanée sur de très grandes distances.



Doc. 1 Les ondes électromagnétiques : fréquences et longueurs d'onde dans le vide.

Les informations, peuvent être transmises par l'intermédiaire d'ondes électromagnétiques (Doc. 1) comme par exemple :

- un signal sonore transporté par de la lumière visible (voir page 92) ;
- La lumière visible, dont la longueur d'onde dans le vide est comprise entre 400 nm et 800 nm, fait partie de la gamme des ondes électromagnétiques.
- une information envoyée grâce à des ondes infrarouges dans le cas des télécommandes ;
- un signal numérisé transmis par des ondes électromagnétiques qui se propagent par fibres optiques dans la téléphonie ;
- un signal sonore transporté par les ondes hertziennes dans le cas de la radio.

Ces ondes électromagnétiques se propagent dans le vide ou dans l'air avec la célérité $c = 3 \times 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

Elles sont caractérisées par leur fréquence f et par leur longueur d'onde λ dans l'air ou le vide.

Ces grandeurs sont liées par la relation :

$$\lambda = \frac{c}{f}$$

avec λ exprimé en mètre (m), c en mètre par seconde ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) et f en hertz (Hz).



Doc. 2 Antennes d'émission de Radio-Vatican.

2. Les ondes hertziennes

En 1888, Heinrich HERTZ réussit à l'aide d'un circuit oscillant à produire des ondes électromagnétiques dont la longueur d'onde est un million de fois plus grande que celle de la lumière. On leur donna le nom d'ondes radio ou ondes hertziennes (Doc. 1).

Les ondes hertziennes utilisées en radio, dont les longueurs d'onde dans le vide sont comprises entre 1 cm et 2 000 m, se propagent depuis une antenne d'émission (Doc. 2) jusqu'à une antenne de réception (Doc. 3).

Dans le cas de la radio, l'information est transmise à distance, sans déplacement de matière en modulant une onde hertzienne qui se propage entre un émetteur et un récepteur.



Doc. 3 Antenne de réception.

3. La transmission d'informations par modulation d'une tension

Une onde sonore est transformée en signal électrique de même fréquence par un microphone.

Ce signal électrique ne peut être transmis directement par voie électromagnétique. En effet, les ondes électromagnétiques, de faibles et de mêmes fréquences que les ondes sonores, se propagent mal dans l'air

[Doc. 4].

On transmet l'information (signal modulant) en modulant une onde électromagnétique de haute fréquence (porteuse).

Cette onde électromagnétique est engendrée par une tension sinusoïdale que l'on modélise par une fonction mathématique de la forme :

$$u(t) = U_m \cdot \cos(2\pi \cdot f \cdot t + \phi_0) \text{ [Doc. 5].}$$

Ses paramètres sont :

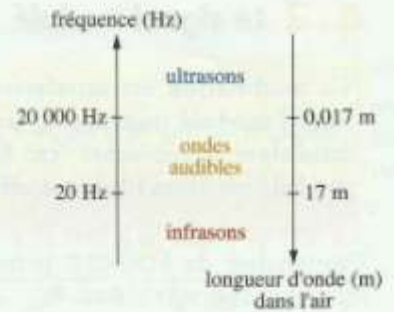
• U_m , l'amplitude ;

• f , la fréquence ($f = \frac{1}{T}$) ;

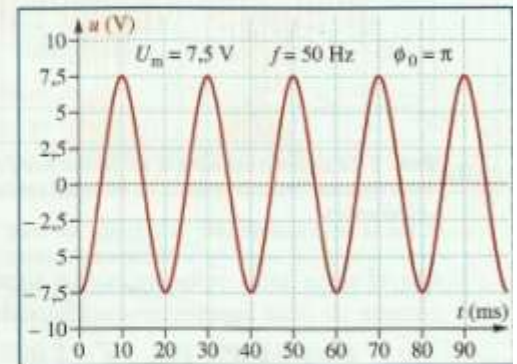
• ϕ_0 , la phase à l'origine des dates. Sa valeur dépend de la date de déclenchement de l'acquisition.

La transmission de l'information peut être réalisée par modulation de l'amplitude, de la fréquence ou de la phase à l'origine de l'onde porteuse par le signal informatif à transmettre.

On étudiera la transmission par modulation d'amplitude.



Doc. 4 Fréquences des ondes sonores.



Doc. 5 Tension modélisée par la fonction mathématique : $u(t) = 7,5 \cdot \cos(2\pi \cdot 50t + \pi)$.

4. La modulation d'amplitude

4.1 Le montage multiplieur

On utilise un circuit intégré appelé multiplieur afin de réaliser une modulation d'amplitude. Le multiplieur comporte deux entrées. On applique sur l'une des entrées la tension modulante $u_1(t)$, somme de la tension $u(t)$ (signal à transmettre) et d'une tension continue U_0 nommée tension de décalage.

On applique la tension porteuse $u_2(t)$ de haute fréquence F sur la deuxième entrée [Doc. 6].

Pour simplifier, nous supposons que l'information à transmettre se limite à une seule grandeur sinusoïdale de fréquence f .

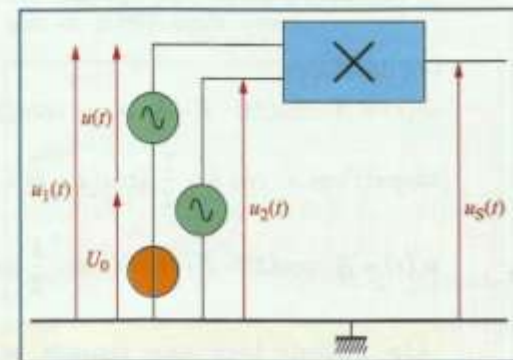
Le circuit multiplieur donne en sortie une tension $u_s(t)$ telle que :

$$u_s(t) = k \cdot u_1(t) \cdot u_2(t) = k \cdot [u(t) + U_0] \cdot u_2(t).$$

Le coefficient multiplicateur k dépend du multiplieur, il est exprimé en V^{-1} .

Cette tension u_s engendre des oscillations électriques dans l'antenne reliée à la sortie du multiplieur.

Ces oscillations électriques créent une onde électromagnétique qui se propage alors dans tout l'espace.

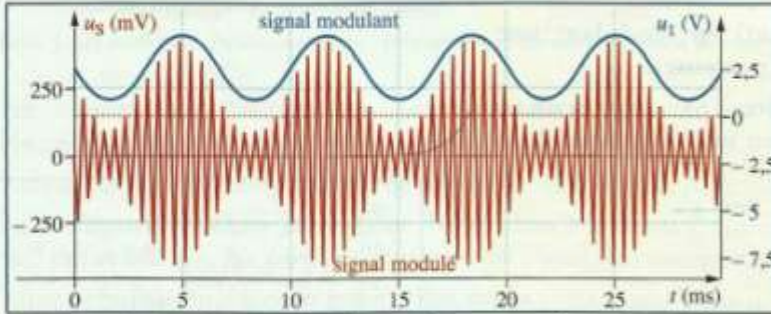


Doc. 6 Montage multiplieur.
 $u_2(t)$: porteuse de fréquence $F = 2\,000\text{ Hz}$;
 $u(t)$: signal à transmettre de fréquence $f = 150\text{ Hz}$.

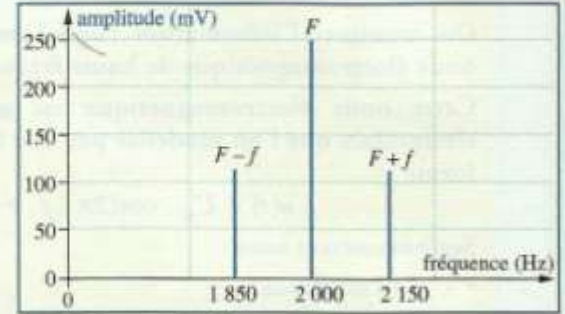
4.2 Le signal modulé

La modulation est satisfaisante lorsque l'enveloppe supérieure du signal modulé (représenté en rouge) « suit » les variations du signal modulant (représenté en bleu) [Doc. 7]. L'amplitude du signal modulé est alors fonction affine du signal modulant.

Une analyse de FOURIER permet d'obtenir le spectre de fréquences du signal modulé $u_s(t)$ [Doc. 8].



Doc. 7 Le signal modulant u , de fréquence $f = 150$ Hz et le signal modulé u_s . Pour une meilleure lisibilité, les échelles verticales des courbes u_s et u , sont différentes.



Doc. 8 Spectre de fréquences.

On observe trois fréquences. Le signal modulé est donc composé de la somme de trois signaux sinusoïdaux de fréquences respectives [Doc. 8] :

$$F - f = 1850 \text{ Hz}, \quad F = 2000 \text{ Hz} \quad \text{et} \quad F + f = 2150 \text{ Hz}.$$

Retrouvons ces fréquences en calculant l'expression de la tension modulée dans le cas de tensions sinusoïdales. L'expression de la tension modulante est :

$$u_1(t) = U_0 + U_m \cdot \cos(2\pi \cdot f \cdot t).$$

L'expression de la tension porteuse est :

$$u_2(t) = U_{2m} \cdot \cos(2\pi \cdot F \cdot t).$$

Afin de simplifier les calculs, on considère que les phases à l'origine sont égales à zéro.

$$u_s(t) = k (U_0 + U_{1m} \cdot \cos(2\pi \cdot f \cdot t)) \cdot U_{2m} \cdot \cos(2\pi \cdot F \cdot t).$$

On écrit généralement :

$$u_s(t) = A (1 + m \cdot \cos(2\pi \cdot f \cdot t)) \cdot \cos(2\pi \cdot F \cdot t)$$

en posant $A = k \cdot U_0 \cdot U_{2m}$ et $\bar{m} = \frac{U_m}{U_0}$ (taux de modulation).

On développe :

$$u_s(t) = A \cdot \cos(2\pi \cdot F \cdot t) + A \cdot m \cdot \cos(2\pi \cdot f \cdot t) \cdot \cos(2\pi \cdot F \cdot t).$$

$$\text{Rappel : } \cos a \cdot \cos b = \frac{1}{2} [\cos(a + b) + \cos(a - b)].$$

$$u_s(t) = A \cdot \cos(2\pi \cdot F \cdot t) + A \cdot m \cdot \frac{1}{2} [\cos(2\pi(F + f)t) + \cos(2\pi(F - f)t)].$$

On obtient bien une tension $u_s(t)$, somme de trois fonctions sinusoïdales de fréquences :

$$F, F - f \quad \text{et} \quad F + f.$$

4.3 Les signaux réels modulés

En réalité, pour un émetteur radio dont la porteuse est $F = 162 \text{ kHz}$, les fréquences des signaux réels à transmettre [Doc. 9] vont de 100 Hz à 5 kHz (signaux audio).

Le spectre va donc, outre la porteuse, comporter deux bandes latérales [Doc. 10] $[162 - 5 ; 162 - 0,1]$ et $[162 + 0,1 ; 162 + 5]$.

Chaque station d'émission radio en modulation d'amplitude peut légalement émettre sur une bande de 9 kHz de largeur centrée sur la porteuse.

Les fréquences supérieures à $4,5 \text{ kHz}$ ne pourront donc pas être transmises. La modulation d'amplitude ne permet donc pas de reproduire fidèlement des signaux sonores complexes.

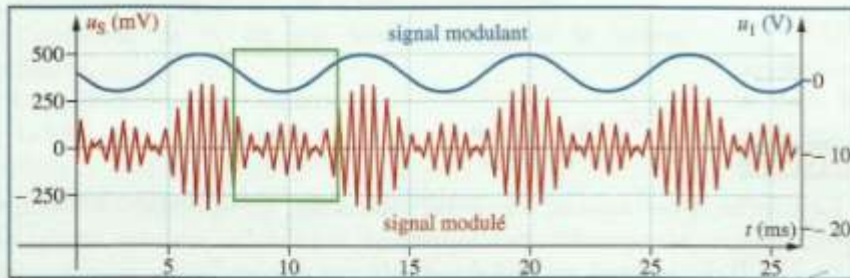
4.4 La surmodulation

Pour obtenir une modulation satisfaisante, la tension de décalage U_0 doit être supérieure à l'amplitude de la tension du signal $u(t)$ (signal à transmettre) transportant l'information : dans ce cas, le taux de modulation m est tel que :

$$m = \frac{U_{\max}}{U_0} < 1.$$

Si le taux de modulation est supérieur à 1, on observe un phénomène de surmodulation [Doc. 11].

L'enveloppe supérieure du signal modulé ne « suit » plus les variations du signal modulant.



Doc. 11 Surmodulation. Pour une meilleure lisibilité, les échelles verticales des courbes u_s et u_1 sont différentes.

Dans l'encadré vert, l'enveloppe supérieure du signal modulé ne « suit » pas les variations du signal modulant.

Dans ce cas, l'émission radio est de mauvaise qualité. La réception radio sera également de mauvaise qualité.

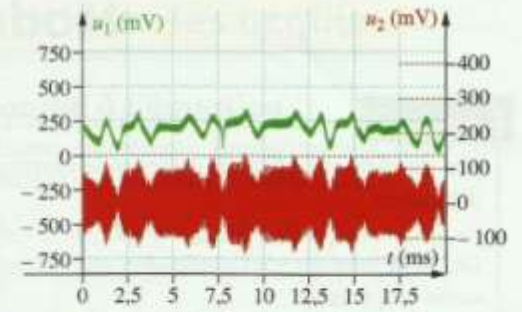
4.5 La qualité de la modulation

Afin de vérifier si la modulation est satisfaisante, on utilise la méthode du « trapèze ».

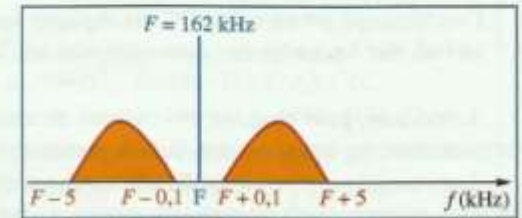
On représente le graphique de la tension de sortie $u_s(t)$ en fonction de la tension modulante $u_1(t)$.

La modulation est satisfaisante lorsque le graphique obtenu a la forme d'un trapèze [Doc. 12. a].

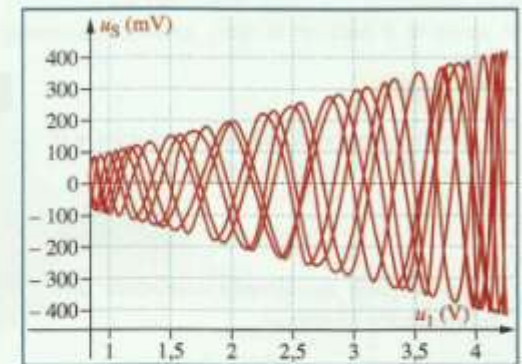
En revanche, lorsqu'il y a surmodulation le graphique n'a plus la forme d'un trapèze [Doc. 12. b].



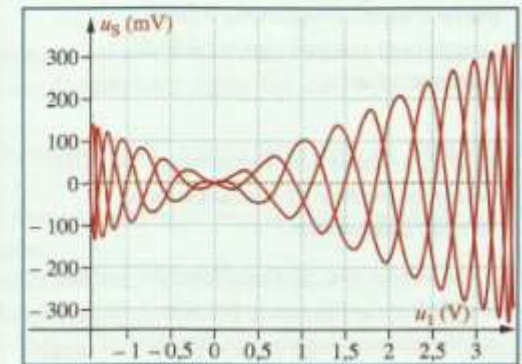
Doc. 9 Un exemple de signal réel modulé. Le signal modulant est représenté en vert et le signal modulé en rouge. Pour une meilleure lisibilité, les échelles des courbes u_1 et u_2 sont différentes.



Doc. 10 Spectre de fréquences dans le cas d'une modulation réelle.



Doc. 12. a Modulation correcte.



Doc. 12. b Modulation incorrecte.

Nous avons vu dans le chapitre précédent comment émettre un signal modulé en amplitude. La réception radio consiste à capter ce signal, le démoduler afin de récupérer le signal informatif et le transformer en signal sonore.

On se propose, pour simplifier l'étude, d'utiliser un signal informatif sinusoïdal de fréquence f .

1. Réception du signal modulé en amplitude : le circuit d'accord

Pour filtrer le signal modulé en amplitude, il faut un circuit électrique capable de sélectionner une bande de fréquences comprise entre $F - f$ et $F + f$, avec F la fréquence de la porteuse et f la fréquence du signal modulant.

La sélection se fait sur un poste radio en tournant le bouton de recherche de station. On intervient alors sur le circuit d'accord constitué d'une bobine et d'un condensateur associés en parallèle en modifiant soit l'inductance de la bobine, soit la capacité du condensateur [Doc. 1].

Au § 1, page 106, on a observé que l'amplitude de la tension aux bornes du dipôle (L, C) passe par un maximum U_{Cmax} pour une fréquence égale à la fréquence propre F_0 du dipôle (L, C) parallèle [Doc. 2], soit :

$$F_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}.$$

On détermine graphiquement les deux fréquences f_1 et f_2 pour lesquelles la tension aux bornes du dipôle (L, C) est égale à $\frac{U_{Cmax}}{\sqrt{2}}$.

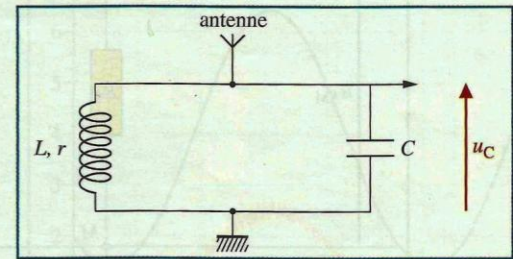
Pour toutes les fréquences comprises entre f_1 et f_2 , la tension U_C est supérieure à $\frac{U_{Cmax}}{\sqrt{2}}$.

Cela correspond aux fréquences des signaux convenablement sélectionnés par le dipôle (L, C).

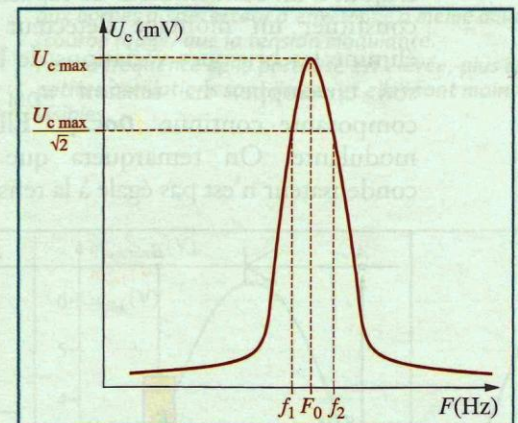
La plage de fréquence $\Delta f = f_2 - f_1$ est appelée bande passante à -3 dB du dipôle (L, C). Le dipôle (L, C) est utilisé comme filtre passe-bande pour la tension.

Pour une bonne réception du signal modulé en amplitude d'une radio :

- un dipôle (L, C) servant de circuit d'accord doit être relié à l'antenne de réception de la radio ;
- la fréquence propre F_0 du circuit d'accord utilisé en filtre passe-bande doit être égale à la fréquence F de la porteuse ;
- la bande passante Δf du circuit d'accord doit encadrer le spectre en fréquence $[F - f, F + f]$ du signal modulé en amplitude, sans être trop large, afin de ne pas capter le spectre en fréquence des stations voisines.



Doc. 1 Schéma du circuit d'accord d'un récepteur radio. La tension u_C aux bornes du condensateur est modulée en amplitude.



Doc. 2 Courbe de réponse en tension d'un dipôle (L, C) soumis à une tension sinusoïdale de fréquence F .

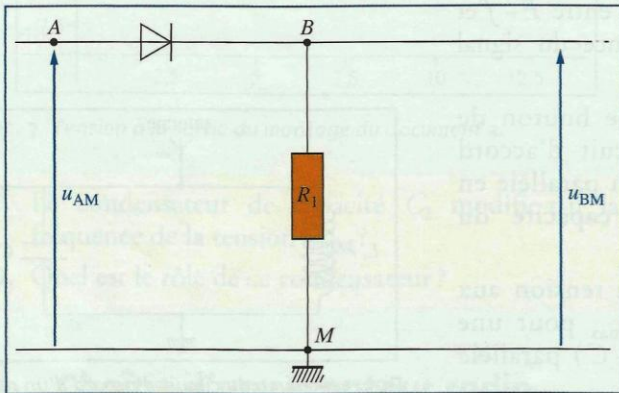
2. La démodulation

Le circuit d'accord permet de sélectionner le signal modulé en amplitude. Le signal informatif ou modulant est contenu dans les enveloppes supérieure et inférieure du signal modulé en amplitude [Doc. 3].

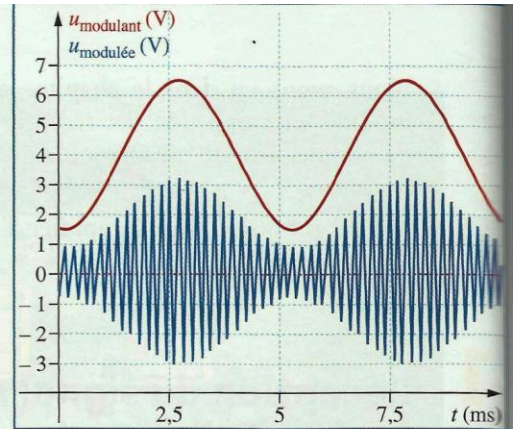
La démodulation va permettre d'isoler ce signal informatif.

2.1 Le montage redresseur

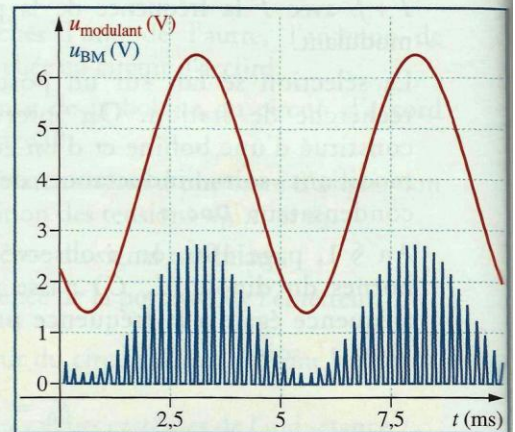
La diode associée au conducteur ohmique de résistance R_1 [Doc. 4] ne laisse passer le courant que dans un sens (de A vers B). Cela élimine les valeurs négatives de la tension modulée en amplitude u_{AM} [Doc. 5]. La tension modulée u_{BM} est dite redressée.



Doc. 4 Montage redresseur. La tension modulée u_c aux bornes du condensateur du circuit d'accord est appliquée entre A et M : $u_c = u_{AM}$.



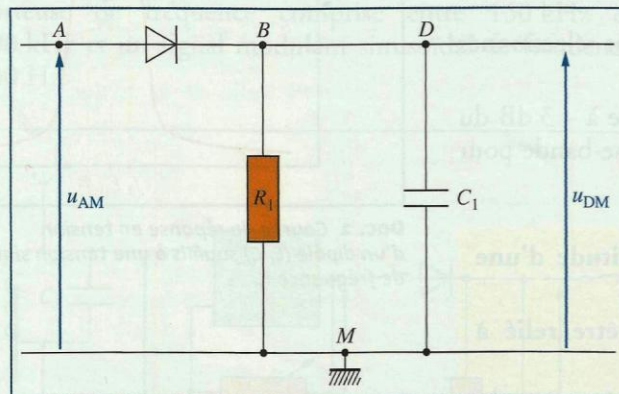
Doc. 3 Signal modulé en amplitude (en bleu) et signal informatif (en rouge). La porteuse a une fréquence F beaucoup plus grande que la fréquence f du signal informatif.



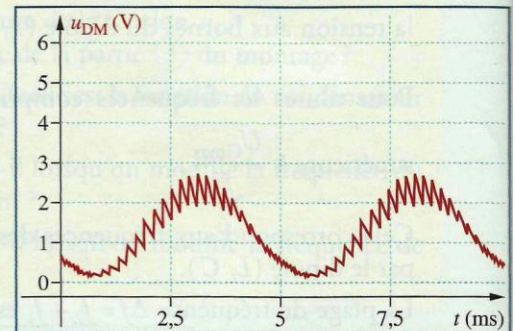
Doc. 5 Tension u_{BM} modulée en amplitude après redressement.

2.2 Le montage détecteur d'enveloppe

L'ajout d'un condensateur de capacité C_1 au montage précédent permet de constituer un montage détecteur d'enveloppe [Doc. 6]. Ce montage élimine les brusques variations de la tension redressée et permet d'isoler son enveloppe. La tension u_{DM} obtenue est dite démodulée avec composante continue [Doc. 7]. Elle a la même allure que la tension modulante. On remarquera que la tension u_{DM} obtenue avec le condensateur n'est pas égale à la tension u_{BM} obtenue sans le condensateur.



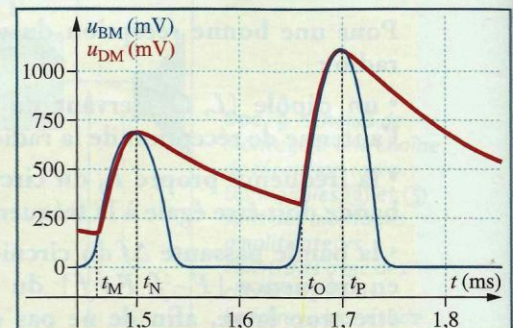
Doc. 6 Pour détecter l'enveloppe, on associe au montage redresseur le condensateur C_1 .



Doc. 7 Tension u_{DM} à la sortie du détecteur d'enveloppe.

Comment se comporte le dipôle $R_1 C_1$ lorsqu'il est soumis à la tension modulée en amplitude redressée ?

À la date t_M [Doc. 8] le condensateur est soumis à la tension modulée redressée u_{BM} de valeur supérieure à la tension à ses bornes u_{DM} . Le condensateur se charge de façon quasi instantanée.



Doc. 8 Tension modulée redressée u_{BM} et tension u_{DM} à la sortie d'un montage détecteur de crête.

La tension u_{DM} suit l'évolution du signal modulé jusqu'à la date t_N .

Au-delà de la date t_N , la tension modulée redressée u_{BM} est inférieure à u_{DM} . La diode est bloquée, le condensateur se décharge à travers le conducteur ohmique de résistance R_1 jusqu'à la date t_O .

Lors de la décharge, le dipôle $R_1 C_1$ a une constante de temps $\tau_1 = R_1 C_1$. Afin que la décharge ne soit pas trop rapide, τ_1 doit être nettement supérieure à la période T de la porteuse, $T \ll \tau_1$.

À la date t_O , la tension modulée redressée u_{BM} devient supérieure à u_{DM} . Le condensateur se charge à nouveau instantanément en suivant l'évolution de la tension modulée jusqu'à la date t_p .

Nous venons de voir que la décharge du condensateur à travers R_1 doit être lente par rapport à la période T de la porteuse. Il faut, en revanche, qu'elle soit suffisamment rapide par rapport à la période T_{mod} du signal modulant. On peut le noter par $\tau_1 < T_{modulant}$ [Doc. 9].

Dans le cas contraire, la tension u_{DM} à la sortie de détecteur d'enveloppe n'a plus l'allure du signal modulant.

Le dipôle $R_1 C_1$ du montage détecteur d'enveloppe doit avoir une constante de temps τ_1 telle que :

$$T_{porteuse} \ll \tau_1 < T_{modulant}$$

Et donc :

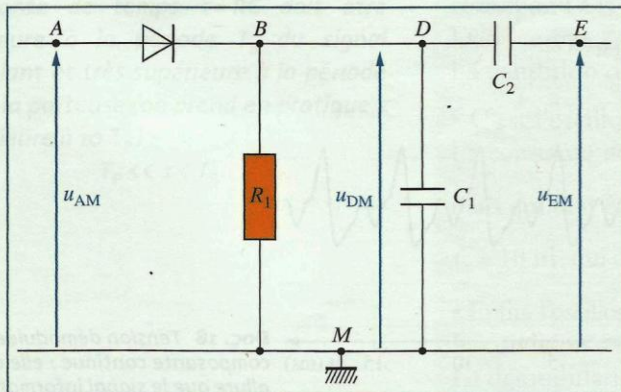
$$f < \frac{1}{\tau_1} \ll F$$

avec f la fréquence du signal informatif ou modulant et F celle de la porteuse.

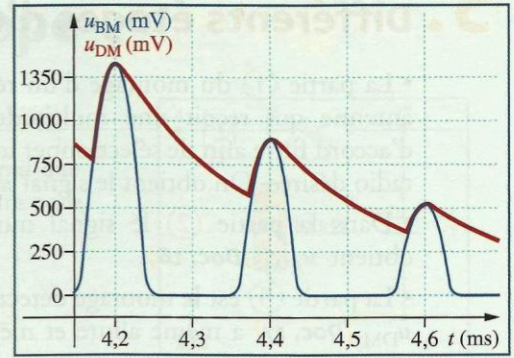
Les conditions ci-dessus étant respectées, la tension u_{DM} à la sortie du montage détecteur d'enveloppe aura une allure d'autant plus proche de celle du signal informatif ($u_{modulant}$) que la fréquence F de la porteuse sera élevée [Doc. 10].

2.3 Élimination de la composante continue

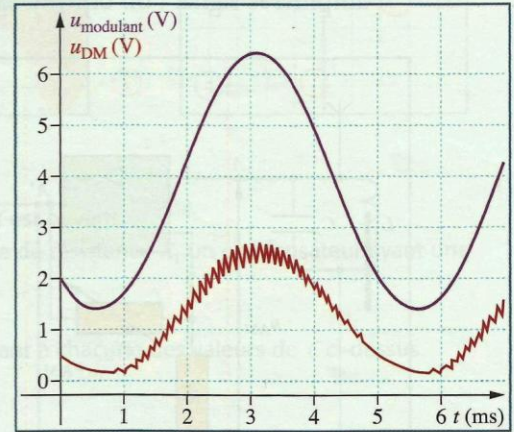
La tension u_{DM} a la même allure et la même fréquence que celles du signal informatif. Cette tension a une composante continue que l'on élimine en ajoutant un condensateur de capacité C_2 à la sortie du montage détecteur d'enveloppe [Doc. 11]. La tension u_{EM} est symétrique par rapport à l'axe des abscisses [Doc. 12].



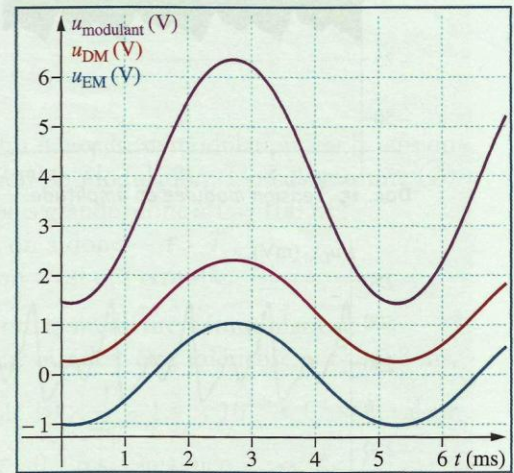
Doc. 11 Montage permettant de récupérer le signal informatif sans composante continue.



Doc. 9 Le condensateur se décharge suffisamment vite. L'allure de la courbe de la tension u_{DM} se rapproche de celle de l'enveloppe du signal modulant.



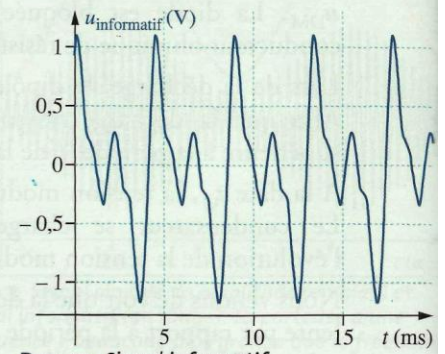
Doc. 10 Aux petites oscillations près, la tension aux bornes du détecteur d'enveloppe a même allure (courbe rouge) que la tension modulante. Plus la fréquence de la porteuse est élevée, plus les petites oscillations sont lissées et elles sont moins visibles.



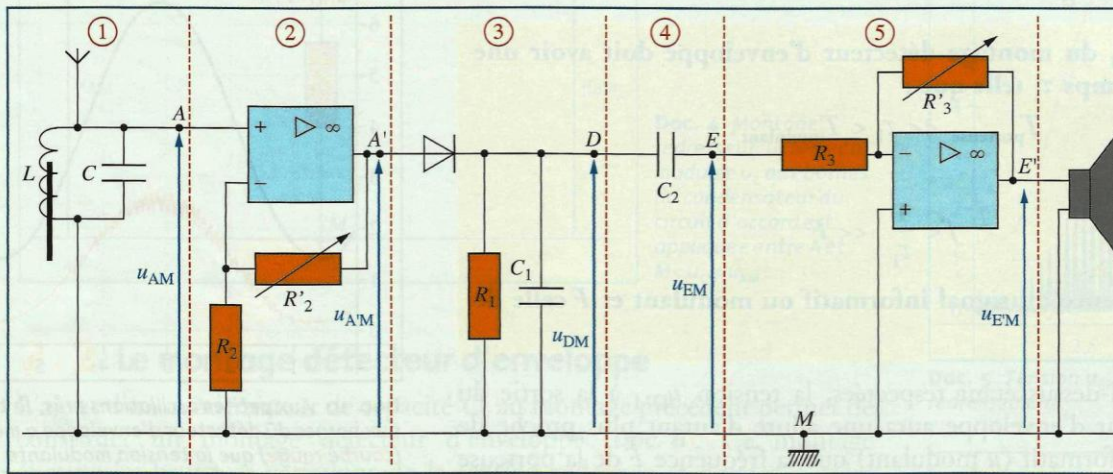
Doc. 12 $u_{modulant}$: signal informatif ; u_{DM} : signal à la sortie du montage détecteur d'enveloppe. Les petites oscillations du document 10 ne sont pas visibles, car la fréquence de la porteuse est élevée ; u_{EM} : signal sans composante continue.

3. Différents étages d'un récepteur radio

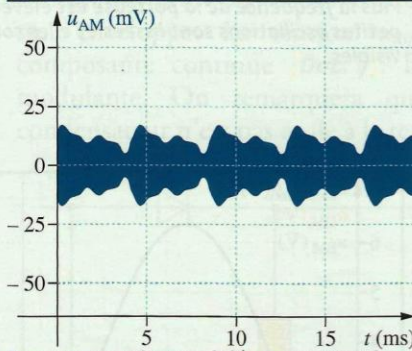
- La partie ① du montage d'un récepteur radio [Doc. 14] comporte une antenne qui reçoit une multitude d'ondes hertziennes que le circuit d'accord filtre afin de sélectionner le signal modulé en amplitude de l'onde radio désirée. On obtient le signal u_{AM} [Doc. 15].
- Dans la partie ② le signal modulé en amplitude est amplifié. On obtient $u_{A'M}$ [Doc. 16].
- La partie ③ est le montage détecteur d'enveloppe. À sa sortie, la tension u_{DM} [Doc. 17] a même allure et même fréquence que le signal informatif [Doc. 13].
- Le condensateur de la partie ④ enlève la composante continue de la tension u_{DM} ; on obtient u_{EM} [Doc. 18].
- La tension u_{EM} est trop faible pour alimenter le haut-parleur. La partie ⑤ amplifie le signal; on obtient $u_{E'M}$ qui alimente le haut-parleur.



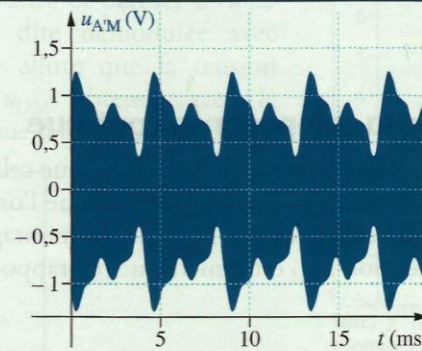
Doc. 13 Signal informatif.



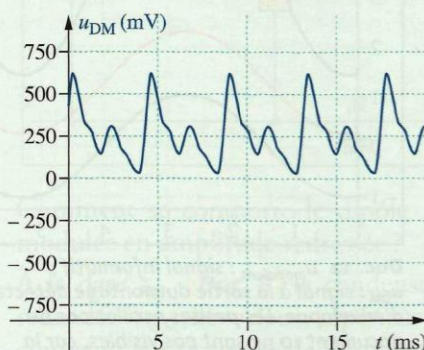
Doc. 14 Schéma de montage d'un récepteur radio.



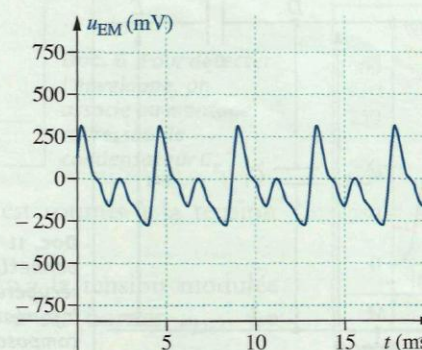
Doc. 15 Tension modulée en amplitude.



Doc. 16 Tension modulée amplifiée.



Doc. 17 Tension démodulée avec composante continue.



Doc. 18 Tension démodulée sans composante continue : elle a même allure que le signal informatif.