

# Module :

# modulation d'amplitude



▶ Diaporama : la modulation d'amplitude

▶ Itinéraire pédagogique

▶ Résumé de cours

- 1- La modulation d'amplitude
- 2- Spectre d'un signal AM
- 3- Production d'un signal AM avec porteuse
- 4- Démodulation d'un signal AM : le détecteur crête
- 5- Démodulation d'un signal AM : le détecteur synchrone

▶ Exercices

▶ Corrigés des exercices

▶ Questionnaire : la modulation d'amplitude

▶ Réponses au questionnaire

# Itinéraire pédagogique : la modulation d'amplitude



## ► Diaporama :

diapos	contenu
1-6	principe et rôle de la modulation
7-18	propriétés du signal AM
19-14	production d'un signal AM
20-23	réception AM
24-25	les AM sans porteuse : BLD, BLU
26-30	la AM numérique
31-38	illustrations

## ► Fondamentaux :

En AM, l'information à transmettre est inscrite dans l'amplitude du signal émis **(1)**.

Le signal AM est un signal dont la puissance dépend du signal modulant et dont le spectre se dessine simplement **(2)** .

Il est en général produit à l'aide d'un multiplieur **(3)** .

La démodulation d'un signal AM se fait par un détecteur crête **(4)** ou mieux par un détecteur synchrone **(5)**.

On trouve la AM dans les télécommunications analogiques (très peu aujourd'hui, sauf en BLU), dans le codage stéréophonique des émissions de la bande FM, dans les télécommunications numériques comme les télécommandes **(7)**, mais aussi dans les signaux issus de nombreux capteurs inductifs, capacitifs ou altimétriques **(5)**.

## ► Exercices :

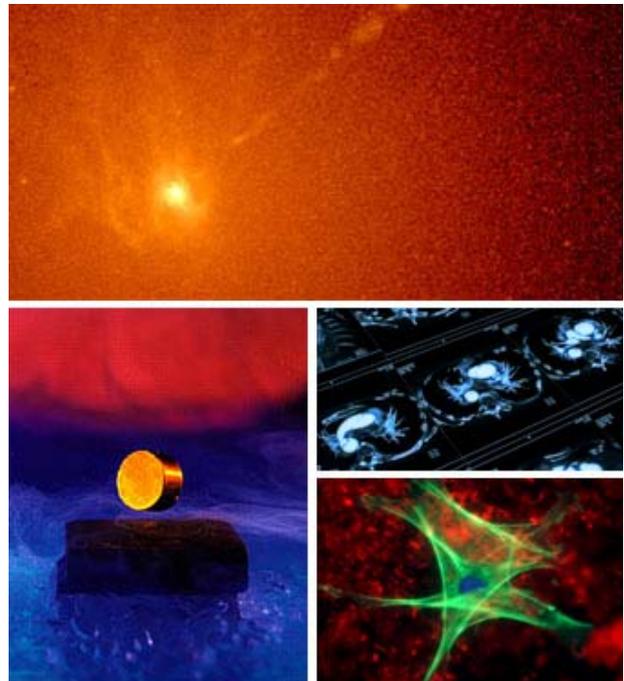
- 1- signal modulé en amplitude
- 2- porteuse modulée AM
- 3- production d'un signal AM
- 4- détection crête et filtrage

- 5- milliohmètre à détection synchrone
- 6- production d'un signal stéréophonique
- 7- modulation ASK

## ► Questionnaire :

De nombreuses applications simples pour tester vos connaissances dans le domaine.

# Résumé de cours



jean-philippe muller

## 1-La modulation d'amplitude (AM)

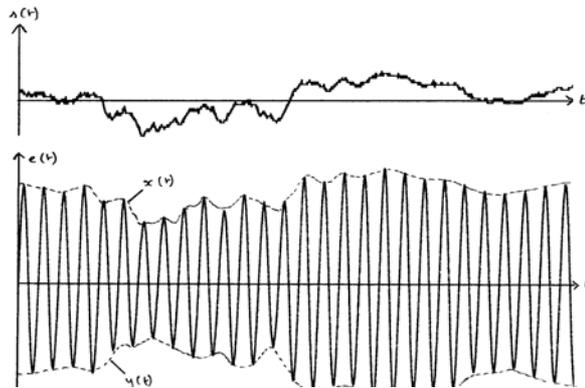
Une porteuse sinusoïdale  $e_o(t) = E \cos(\omega t)$  modulée en amplitude par un signal modulant basse-fréquence  $s(t)$  qui peut être un signal audiofréquence, vidéo, analogique ou numérique s'écrit :

$$e(t) = E (1 + k.s(t)) \cos(\omega t)$$

- en l'absence de signal modulant  $s(t)=0$  et  $e(t) = e_o(t) = E \cos(\omega t)$
- en présence de modulation l'amplitude de la porteuse s'écrit :  $E(1+k.s(t))$

Pour représenter l'allure temporelle d'un signal AM, on utilise les propriétés suivantes :

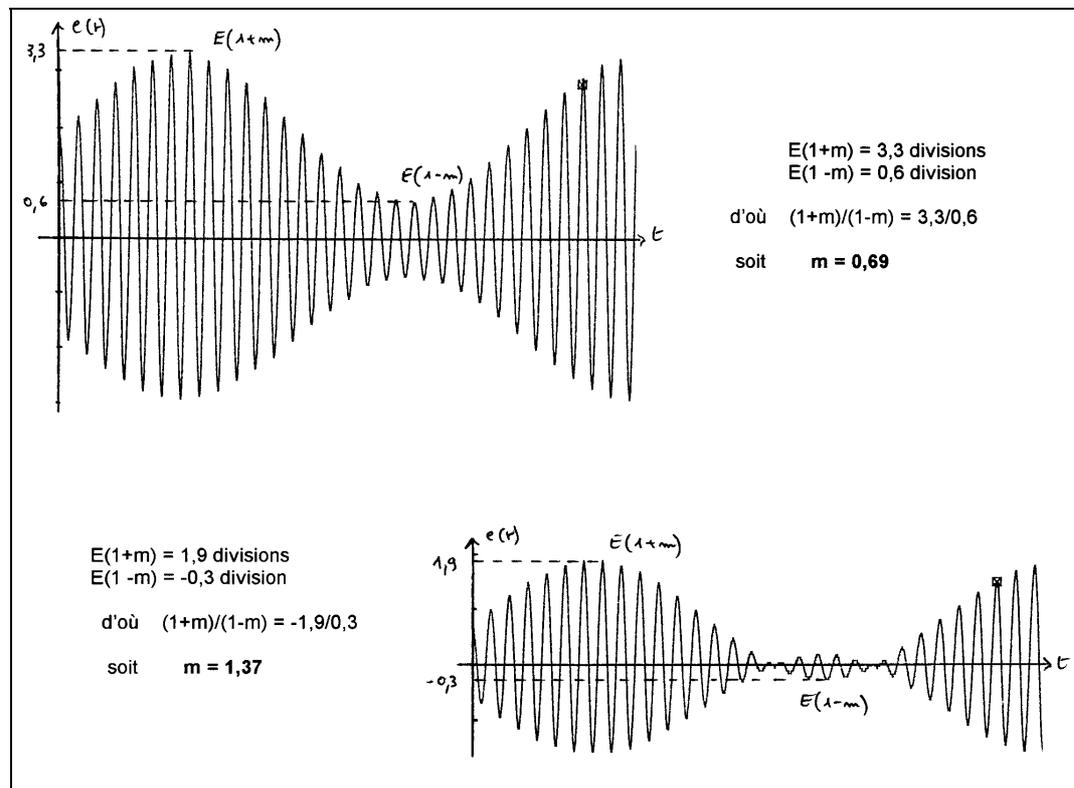
- la porteuse oscille entre deux limites qui sont les enveloppes supérieure et inférieure
- l'enveloppe supérieure a pour équation  $x(t) = E (1 + k.s(t))$  ( lorsque  $\cos(\omega t) = 1$  )
- l'enveloppe inférieure a pour équation  $y(t) = -E (1 + k.s(t))$  ( lorsque  $\cos(\omega t) = -1$  )
- on retrouve la forme du signal modulant  $s(t)$  dans les deux enveloppes



Lorsque le signal modulant est sinusoïdal, on a  $s(t) = a \cos(\Omega t)$  et la porteuse modulée s'écrit :

$$e(t) = E (1 + k a \cos(\Omega t)) \cos(\omega t) = E (1 + m \cos(\Omega t)) \cos(\omega t)$$

**m : indice de modulation**



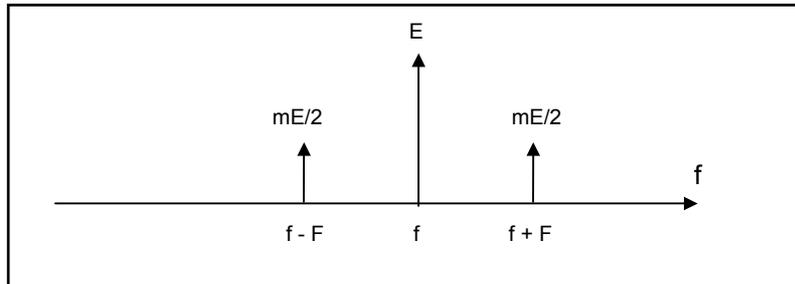
Lorsque l'indice de modulation est supérieur à 1, on parle de **surmodulation**. Lorsqu'on démodule ce signal à l'aide d'un détecteur crête, le surmodulation est à l'origine d'une distorsion inacceptable.

## 2- Spectre d'un signal AM

Si le signal modulant est sinusoïdal, le spectre se calcule facilement :

$$\begin{aligned} e(t) &= E (1 + m \cos(\Omega t)) \cos(\omega t) \\ &= E \cos(\omega t) + E m \cos(\Omega t) \cos(\omega t) \\ &= E \cos(\omega t) + \frac{E m}{2} \cos(\omega + \Omega)t + \frac{E m}{2} \cos(\omega - \Omega)t \end{aligned}$$

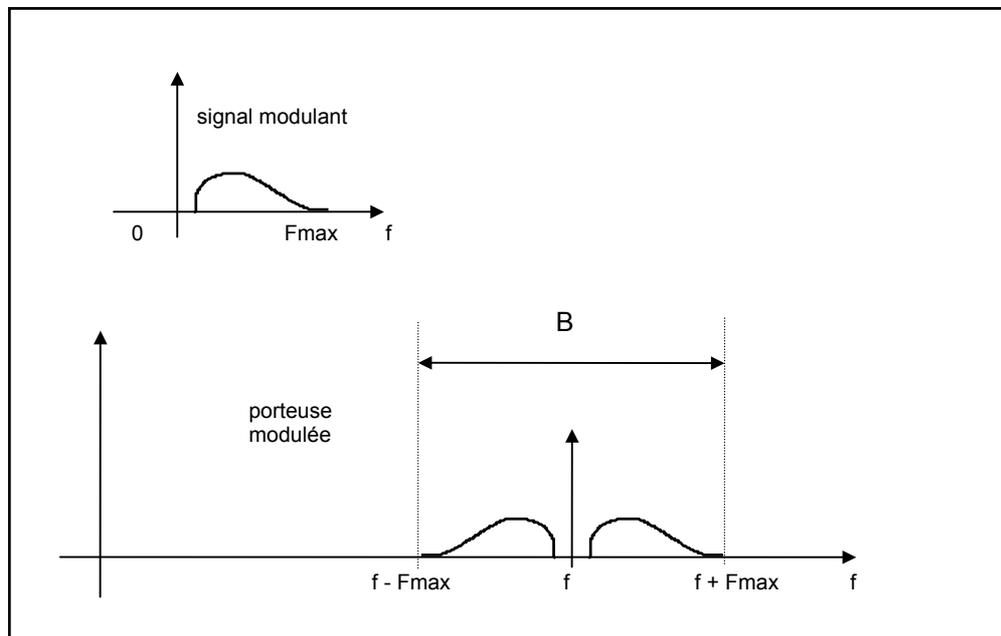
Le spectre est donc formé de 3 raies et a l'allure suivante :



Si le signal modulant est sinusoïdal (spectre limité à 1 raie), on retrouve cette raie de part et d'autre de la porteuse dans le spectre du signal modulé.

On démontre que ce résultat se généralise au cas d'un signal modulant  $s(t)$  quelconque :

- la forme du spectre de  $s(t)$  est plus riche qu'une simple raie
- on appelle  $F_{\max}$  la fréquence la plus élevée contenue dans le signal modulant
- le spectre de  $s(t)$  se retrouve de part et d'autre de la porteuse dans le spectre du signal modulé



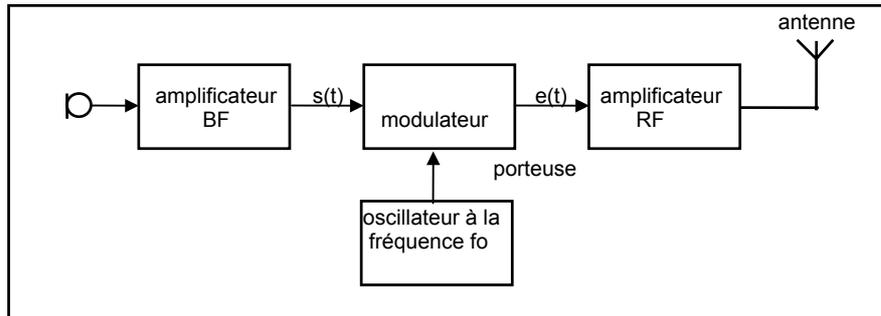
On constate que la bande  $B$  occupée par un signal AM vaut :  **$B = 2.F_{\max}$**

*Applications :*

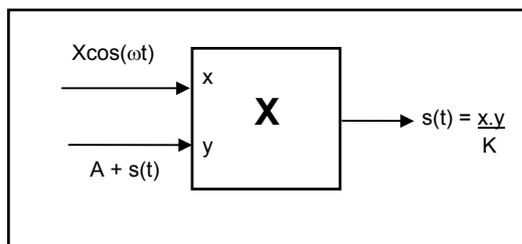
- en radiodiffusion PO ou GO, un émetteur a droit à une bande de 9 kHz, ceci ne peut être réalisé que si on limite le spectre basse-fréquence à 4 kHz
- un canal CB ayant une largeur de 10 kHz, le spectre basse-fréquence doit être limité à 5kHz

### 3- Production d'un signal AM avec porteuse

Lorsqu'on veut transmettre un signal en AM, on module la porteuse par l'information basse-fréquence à l'aide d'un modulateur :



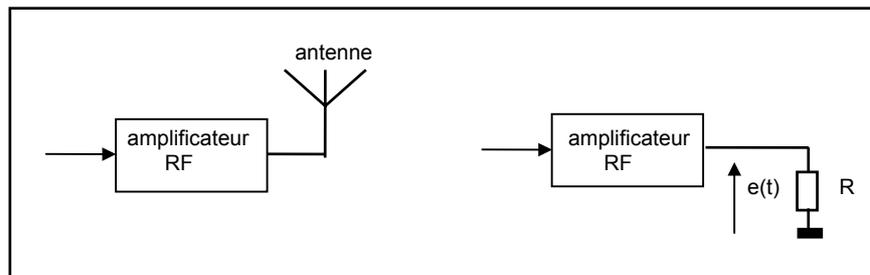
On peut créer facilement un signal AM en multipliant la porteuse par le signal modulant décalé d'une composante continue :



Si on appelle K le coefficient du multiplieur, on aura :  $s(t) = \frac{X\cos(\omega t).(A + s(t))}{K} = \frac{XA}{K} (1 + \frac{1}{A}s(t))\cos(\omega t)$

On peut donc régler l'indice de modulation m en jouant sur la valeur de la composante continue A.

Le signal AM est appliqué à l'antenne qui se comporte vis-à-vis de l'amplificateur de sortie comme une charge résistive R :



La puissance totale dissipée dans l'antenne et donc émise vaut :

$$P = \frac{E^2}{2R} + \frac{(mE/2)^2}{2R} + \frac{(mE/2)^2}{2R} = \frac{E^2}{2R} (1 + \frac{m^2}{2})$$

Exemple numérique :  $E = 50V, m = 0,5, \text{ antenne } R = 50\Omega$

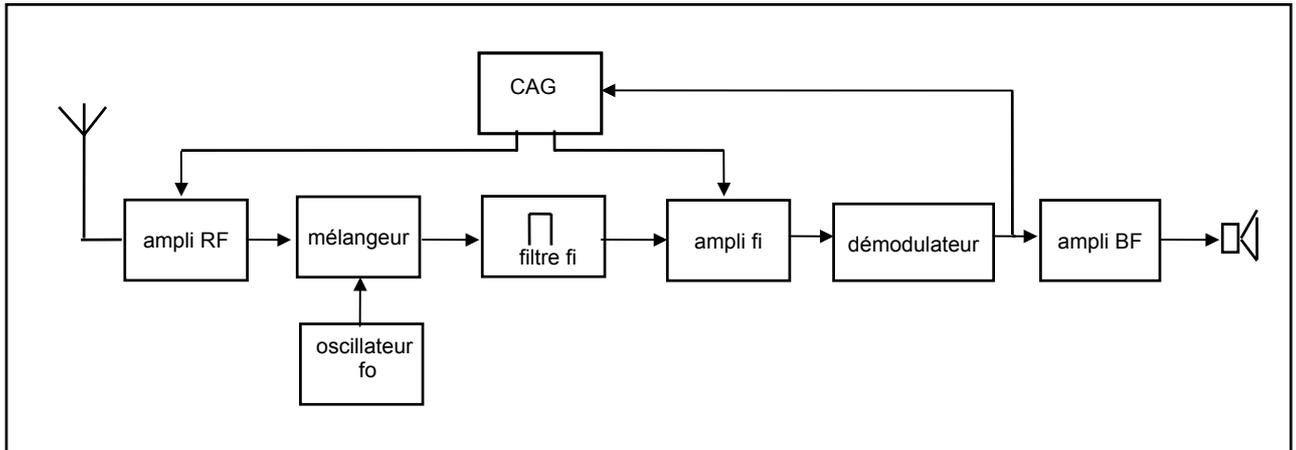
- puissance de la porteuse  $P_p = 25 W$
- puissance pour une raie latérale :  $P_s = P_i = 1,56 W$
- puissance totale de :  $P = 25 + 1,56 + 1,56 = 28,12 W$

On peut noter l'importance de la puissance de la porteuse, qui est émise même en l'absence de signal modulant, alors que l'information se trouve dans les bandes latérales.

On a donc eu l'idée de supprimer la porteuse et d'émettre uniquement les deux bandes latérales (**modulation en bande latérale double**) ou une seule bande latérale (**bande latérale unique**), technique très utilisée aujourd'hui dans les communications mobiles.

#### 4- Démodulation d'un signal AM : le détecteur crête

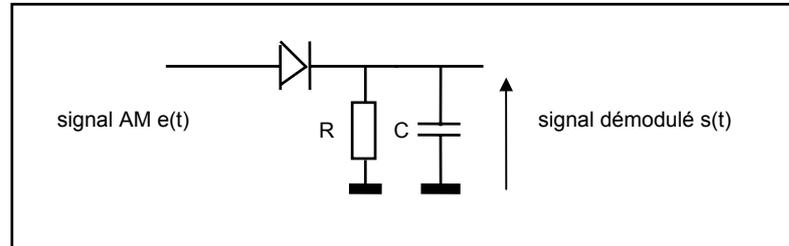
Dans un récepteur AM, le signal peut être démodulé une fois qu'on a sélectionné l'émetteur que l'on désire capter . La sélection est faite à l'aide de la structure habituelle : oscillateur local-mélangeur.



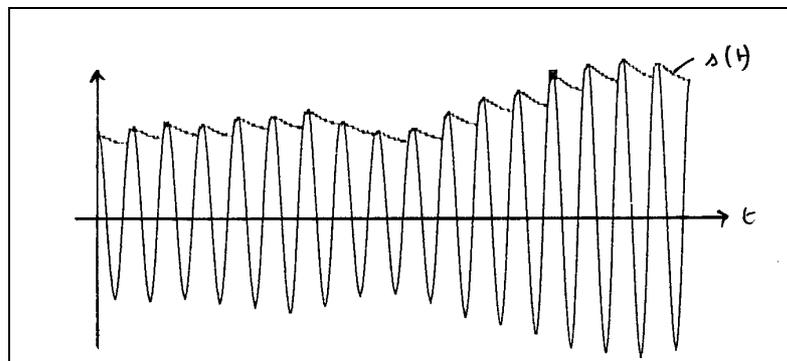
Le signal AM à démoduler, à la fréquence intermédiaire  $f_i$ , peut être traité par un **détecteur crête** ou un **démodulateur synchrone**.

Le **détecteur crête** a le mérite d'une simplicité apparente, mais à cause du seuil de la diode nécessite un niveau suffisant avant démodulation, typiquement de quelques centaines de mV.

On utilisera de préférence une diode à pointe au germanium caractérisée par un faible seuil (0,2V) et une faible capacité parasite.



La constante de temps  $\tau$  du circuit RC doit être grande devant la période de la porteuse et faible devant la période de variation du signal modulant.



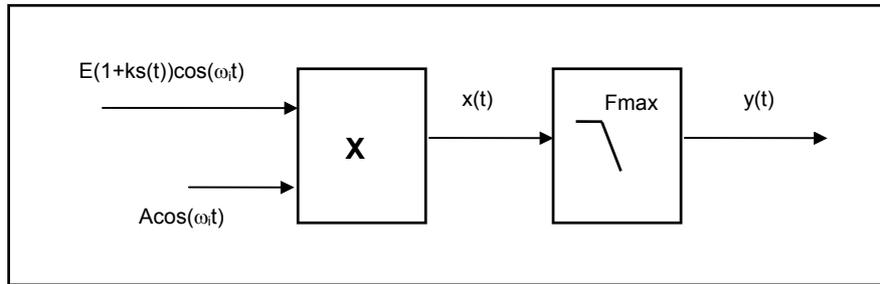
Choix de la constante de temps :

$$\tau = \frac{1}{\sqrt{F_{\max} \cdot f_i}}$$

- si la constante de temps RC est trop grande ou trop faible, le signal démodulé ne reproduit pas fidèlement le signal basse-fréquence modulant
- en cas de surmodulation ce démodulateur introduit une distorsion inacceptable. On évite donc la surmodulation à l'émission en insérant un étage amplificateur à contrôle automatique de gain qui évite les excursions importantes de  $s(t)$

### 5- Démodulation d'un signal AM : le détecteur synchrone

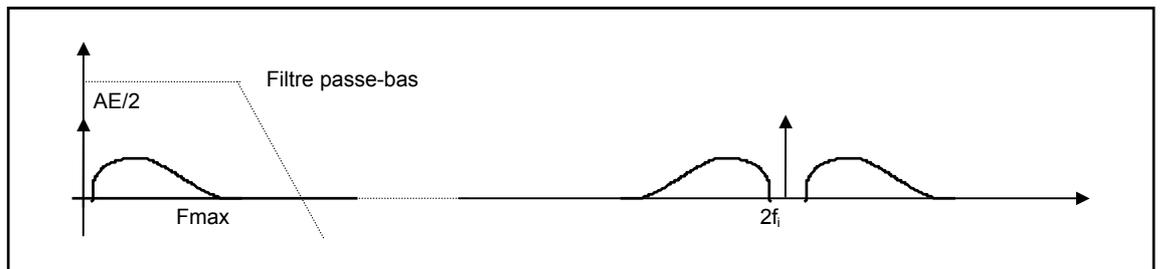
Dans un **démultiplex synchrone**, on multiplie simplement le signal AM par un signal sinusoïdal en phase (synchrone) avec la porteuse :



$$x(t) = AE(1+ks(t))\cos^2(\omega_c t) = AE(1+ks(t)) \frac{1 + \cos(2\omega_c t)}{2}$$

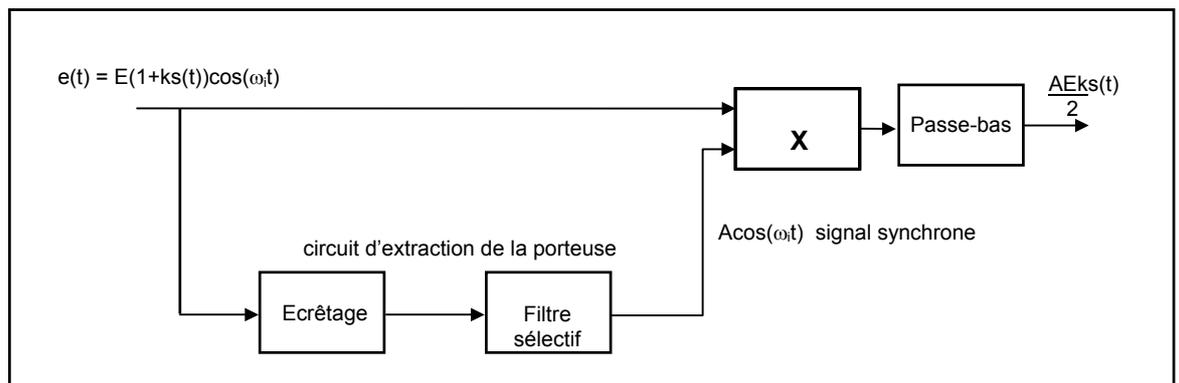
$$= \frac{AE}{2} + \frac{AEk s(t)}{2} + \frac{AE(1+ks(t)) \cos(2\omega_c t)}{2}$$

Le tracé du spectre de  $x(t)$  montre bien que ce signal contient, en partie basse, le signal basse-fréquence modulant  $s(t)$  qui nous intéresse :



Après filtrage et suppression de la composante continue, nous obtenons le signal  $y(t) = \frac{AEk}{2} s(t)$

La détection synchrone nécessite la présence d'un signal synchrone avec la porteuse. Pour l'obtenir dans un récepteur, on peut le fabriquer à partir du signal AM par écrêtage et filtrage sélectif :



Dans certaines applications, le circuit d'extraction de la porteuse est constitué par une boucle à verrouillage de phase accrochée sur la porteuse modulée.

**Remarque :** si le signal é démodulé est fortement bruité, le démodulateur synchrone permet encore la démodulation alors que le détecteur crête ne fonctionne plus.

# Exercices d'application



jean-philippe muller

## Signal modulé en amplitude



Savoir dessiner l'allure temporelle d'un signal modulé en amplitude

On rappelle qu'un signal AM avec porteuse a pour expression :

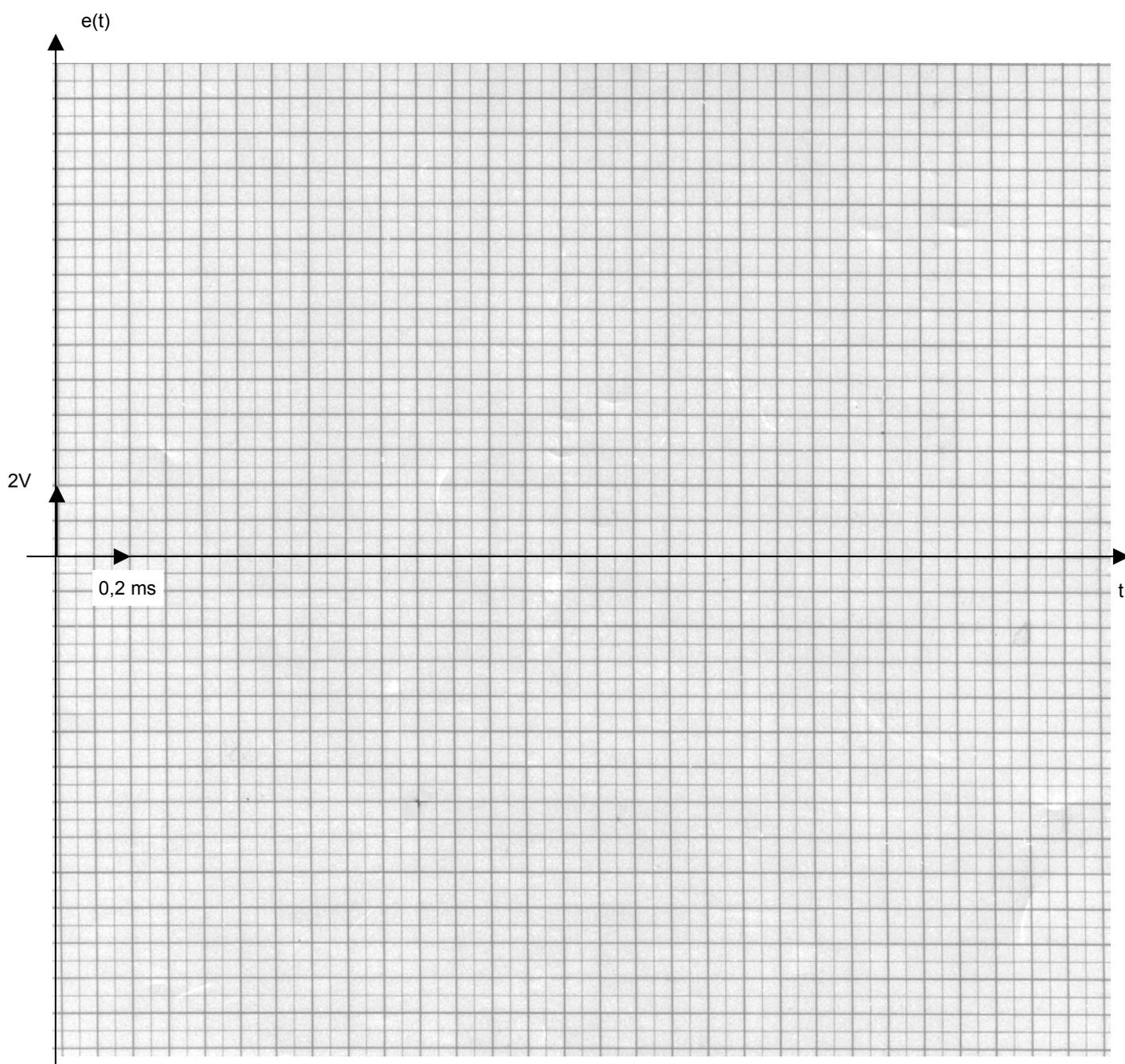
$$e(t) = E(1 + k.s(t)).\cos(\omega t)$$

- le signal modulant  $s(t)$  est carré, de fréquence  $F = 1$  kHz et varie entre  $+4$  et  $-4$ V
- la porteuse est sinusoïdale de fréquence  $f = 400$  kHz et d'amplitude  $5$ V
- le coefficient  $k$  vaut  $0,1$

Écrire les équations des enveloppes supérieure  $x(t)$  et inférieure  $y(t)$  en fonction de  $s(t)$ , puis dessiner l'allure temporelle du signal modulé  $e(t)$ .

$x(t) =$

$y(t) =$



## Porteuse modulée en amplitude

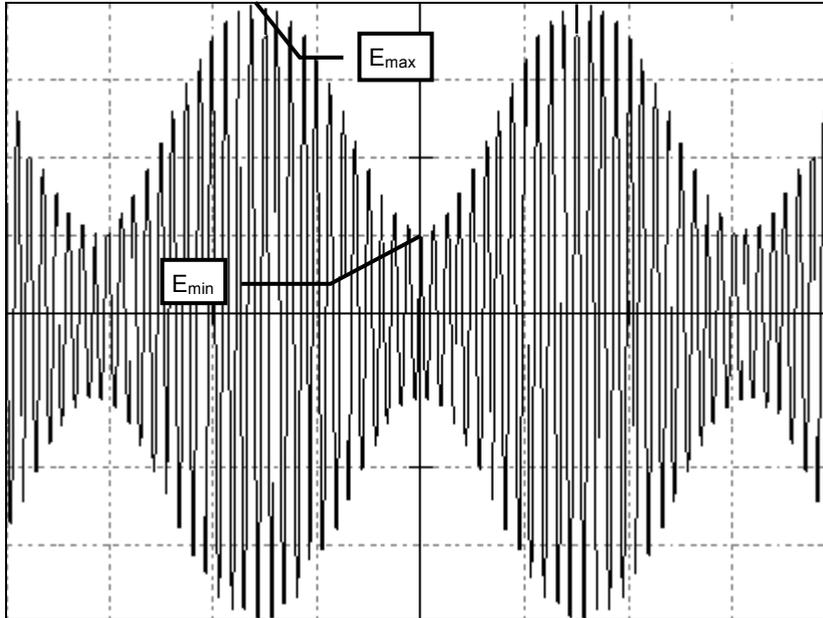


Savoir déterminer l'indice de modulation d'un signal modulé en amplitude

On rappelle qu'un signal AM avec porteuse a pour expression :

$$e(t) = E(1 + k.s(t)).\cos(\omega t)$$

L'enregistrement d'une porteuse modulée par un signal modulant sinusoïdal  $s(t) = a\cos(\Omega t)$  a donné la courbe suivante :



Echelles :

en y : 1V/carreau

en x : 0,1ms/carreau

- 1) Donner l'expression littérale de la porteuse modulée  $e(t)$  en fonction de  $E$  et  $m$ .
- 2) A partir de l'enregistrement fourni, déterminer les valeurs des fréquences  $f$  de la porteuse et  $F$  du signal modulant.
- 3) Exprimer  $E_{\max}$  et  $E_{\min}$ , valeurs max et min de l'enveloppe supérieure, en fonction de  $E$  et  $m$ . Mesurer ces valeurs sur l'enregistrement et en déduire la valeur numérique de l'indice de modulation  $m$ , puis de l'amplitude de la porteuse  $E$ .
- 4) Tracer l'allure du spectre de ce signal et en déduire l'encombrement spectral de ce signal modulé. Calculer la puissance de chaque raie si l'antenne a une résistance de  $R = 10 \Omega$ .



## Production d'un signal AM



comprendre la synthèse d'un signal AM par multiplieur

On rappelle qu'un signal AM avec porteuse a pour expression :  $e(t) = E(1 + k.s(t)).\cos(\omega t)$

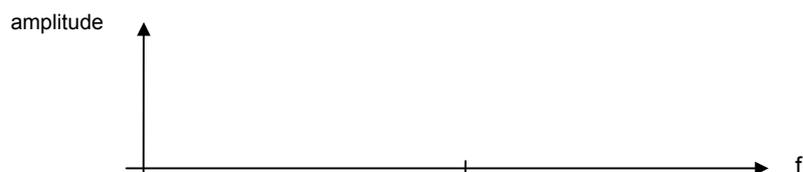
On donne les valeurs numériques suivantes :

- fréquence de la porteuse  $f = 1 \text{ MHz}$
- amplitude de la porteuse  $E = 10 \text{ V}$
- coefficient  $k = 0,1$
- signal modulant sinusoïdal  $s(t) = 5\cos(\Omega t)$  de fréquence  $F = 1 \text{ kHz}$

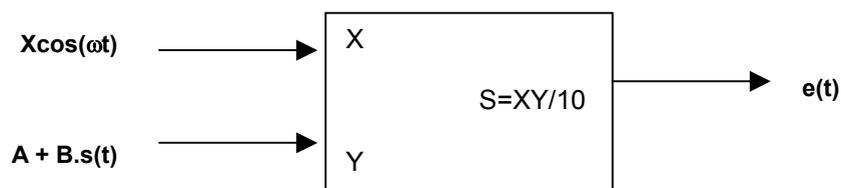
1) Donner l'expression mathématique de  $e(t)$ . Quelles sont les amplitudes limites atteintes par ce signal AM ?

2) Quelle est la valeur de l'indice de modulation  $m$  ?

3) Représenter le spectre du signal  $e(t)$  en précisant l'amplitude et la fréquence des raies.



4) Ce signal AM est fabriqué à l'aide d'un multiplieur selon le schéma suivant :



Exprimer le signal de sortie  $e(t)$  du multiplieur en fonction de  $A, B$  et  $X$  et proposer des valeurs pour  $A, B$  et  $X$  compatibles avec une électronique alimentée en  $\pm 15\text{V}$ .

## Détection crête et filtrage



Comprendre le fonctionnement d'un détecteur crête à filtre actif (d'après BTS 2004)

Un récepteur ILS reçoit d'une balise émettrice placée au sol un signal à  $f_p = 108,9$  MHz modulé en amplitude par deux signaux modulateurs à  $F_1 = 90$  Hz et  $F_2 = 150$  Hz.

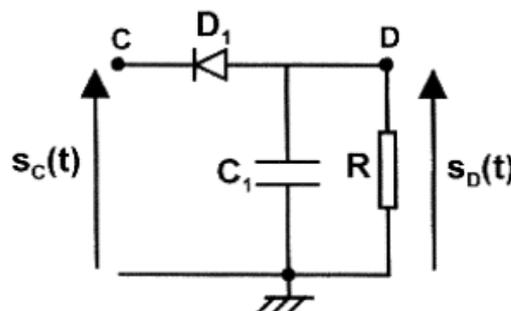
A partir de ces signaux BF, le calculateur du récepteur déduit des indications concernant la pente de l'avion en atterrissage et sa déviation par rapport à l'axe de la piste.

Le récepteur est à double changement de fréquence avec une première  $f_i$  à 21,4 MHz et une seconde  $f_i$  à 168,5 kHz.

Le signal en sortie du second étage  $f_i$  a pour expression :

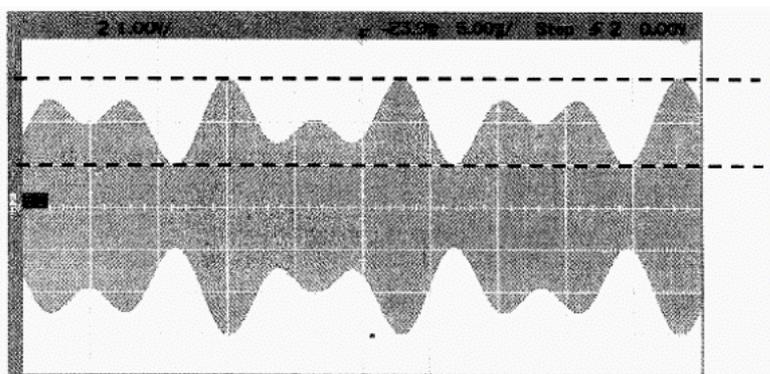
$$s_c(t) = A_c [1 + m_1 \cos(2\pi F_1 t) + m_2 \cos(2\pi F_2 t)] \cdot \cos(2\pi f_i t)$$

Il est démodulé par le circuit ci-contre :

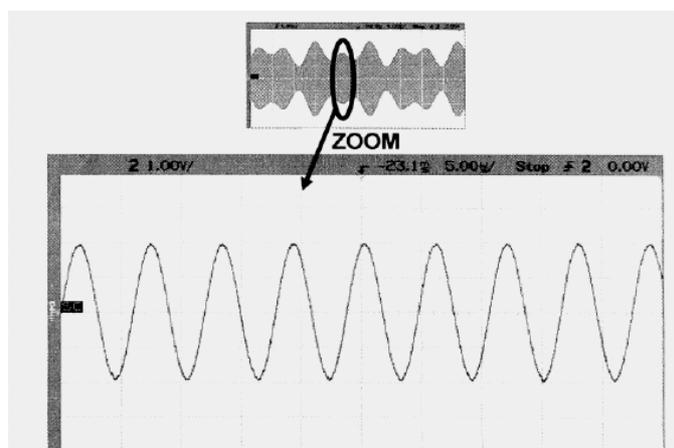


1) D'une façon générale, quelle est la condition à respecter sur l'indice de modulation pour pouvoir utiliser un démodulateur à diode ?

2) Sur la courbe représentant  $s_c(t)$ , préciser les expressions en fonction de  $A_c$ ,  $m_1$  et  $m_2$  des niveaux repérés par les pointillés. En déduire la condition liant  $m_1$  et  $m_2$  pour avoir un signal démodulé correct.

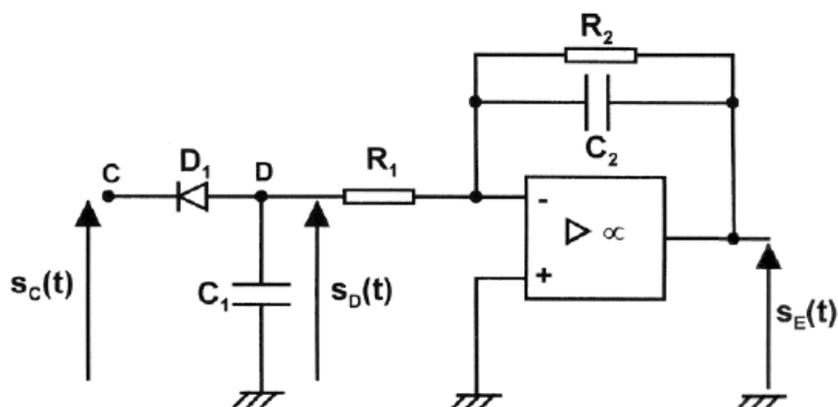


3) En supposant la diode  $D_1$  idéale, dessiner l'allure de  $s_D(t)$  et décrire les deux phases de fonctionnement du montage.

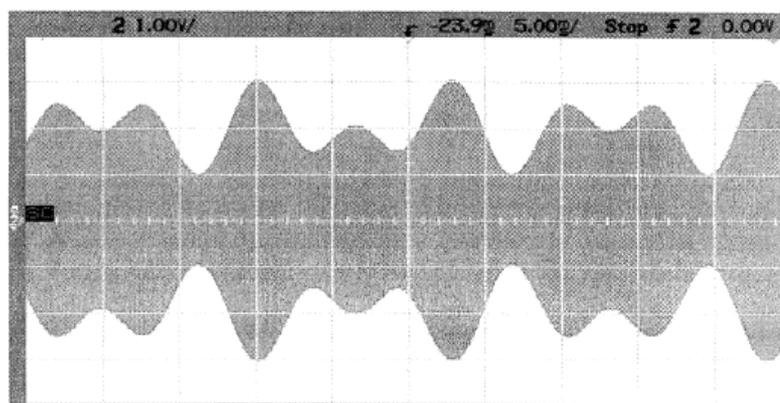


4) Quelle condition doit satisfaire la constante de temps  $R.C_1$  en fonction de la période  $T$  du signal modulé  $s_c(t)$  ? Sachant que  $R = 47 \text{ k}\Omega$ , quelle valeur de  $C$  est la plus appropriée :  $47 \text{ pF}$ ,  $220 \text{ pF}$  ou  $470 \text{ pF}$  ?

En réalité, le détecteur crête est associé à un filtre actif et la structure réellement utilisée pour la démodulation est la suivante :



5) Représenter l'allure de la tension  $s_D(t)$  qu'on obtient avec ce montage :



6) Déterminer la fonction de transfert  $\underline{I}(j\omega)$  du filtre en fonction des éléments du montage. Exprimer sa transmittance statique  $T_0$  sachant que  $R_1 = R_2$  et sa fréquence de coupure  $f_c$ .

7) On désire atténuer de 40 dB l'ondulation résiduelle à 168,5 kHz. Quelle doit être alors la fréquence de coupure du filtre ? Si  $R_1 = R_2 = 47 \text{ k}\Omega$ , calculer la valeur de  $C_2$ .

8) Représenter alors le signal  $s_E(t)$  sur le graphe de la question 5).

## Milliohmètre à détection synchrone

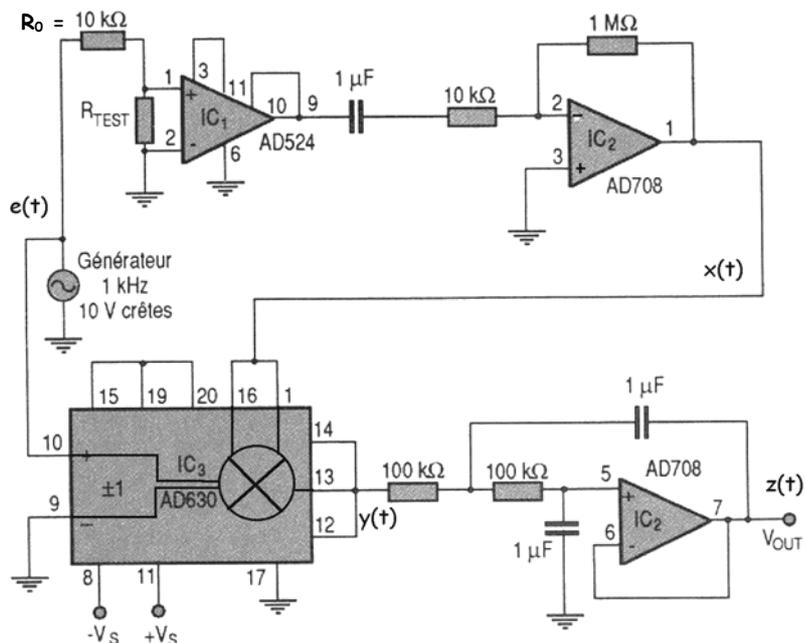


comprendre le principe et l'utilité de la démodulation synchrone

Les mesures de résistances faibles en courant continu sont délicates car les faibles tensions mises en jeu peuvent être perturbées par la tension de décalage (offset) des amplificateurs opérationnels.

La solution consiste à alimenter la résistance à mesurer en alternatif et d'utiliser une démodulation synchrone pour récupérer l'information sur l'amplitude.

- la résistance  $R_{\text{test}}$  à mesurer est inférieure à  $1\Omega$
- elle est alimentée par une tension  $e(t) = E\cos(\omega_0 t)$  avec  $E = 10\text{ V}$  et  $f_0 = 1\text{ kHz}$ .
- l'amplificateur d'instrumentation AD524 est caractérisé par une amplification de 1000
- le condensateur de liaison de  $1\mu\text{F}$  est un court-circuit à la fréquence de travail



1) Exprimer la tension sinusoïdale  $x(t)$  en sortie du AD708 en fonction de  $R_{\text{test}}$ ,  $R_0$ , et  $\omega_0$ . Simplifier cette relation en tenant compte du fait que  $R_{\text{test}} \ll R_0$  et exprimer  $x(t)$  en fonction de  $R_{\text{test}}$  et  $\omega_0$ .

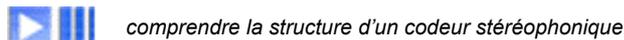
Le signal  $x(t)$  est donc un signal sinusoïdal dont l'amplitude dépend de la résistance inconnue. Plutôt qu'avec un détecteur crête, on récupère l'information « amplitude » par un détecteur synchrone construit autour du AD630.

2) Sachant que IC3 produit en sortie le signal  $y(t) = -0,1 \cdot x(t) \cdot e(t)$ , donner l'expression de  $y(t)$  en fonction de  $R_{\text{test}}$  et  $\omega_0$ . On rappelle que :  $\cos^2(x) = 0,5 + 0,5\cos(2x)$ .

3) Quel est le type du filtre qui fait passer de  $y(t)$  à  $z(t)$  ? quelle est sa transmittance statique ? Sachant que sa fréquence de coupure est de l'ordre du Hertz, en déduire que le signal  $z(t)$  se limite pratiquement à une tension continue  $V_{\text{out}}$  qu'on exprimera en fonction de la résistance à mesurer  $R_{\text{test}}$ .

4) Quelle est la valeur de la résistance  $R_{\text{test}}$  si  $V_{\text{out}} = 0,1\text{V}$  ?

## Production d'un signal stéréo

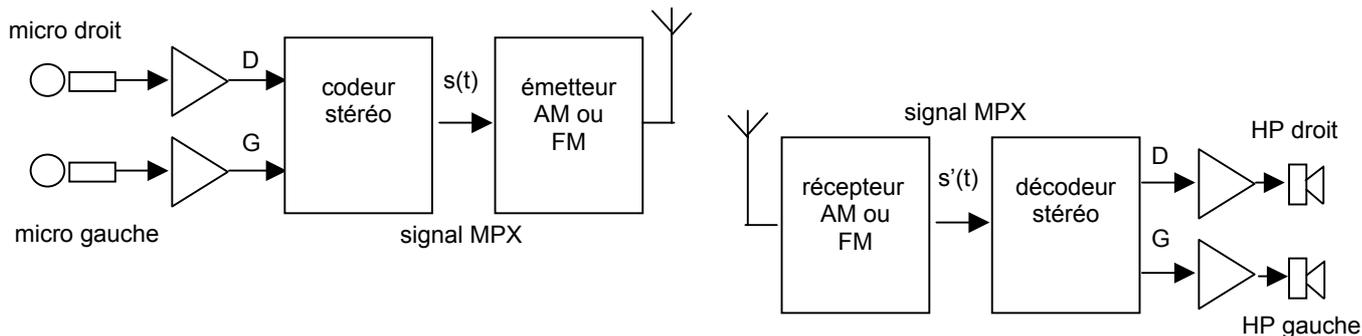


comprendre la structure d'un codeur stéréophonique

Pour obtenir un effet stéréophonique, il faut transmettre simultanément deux signaux :

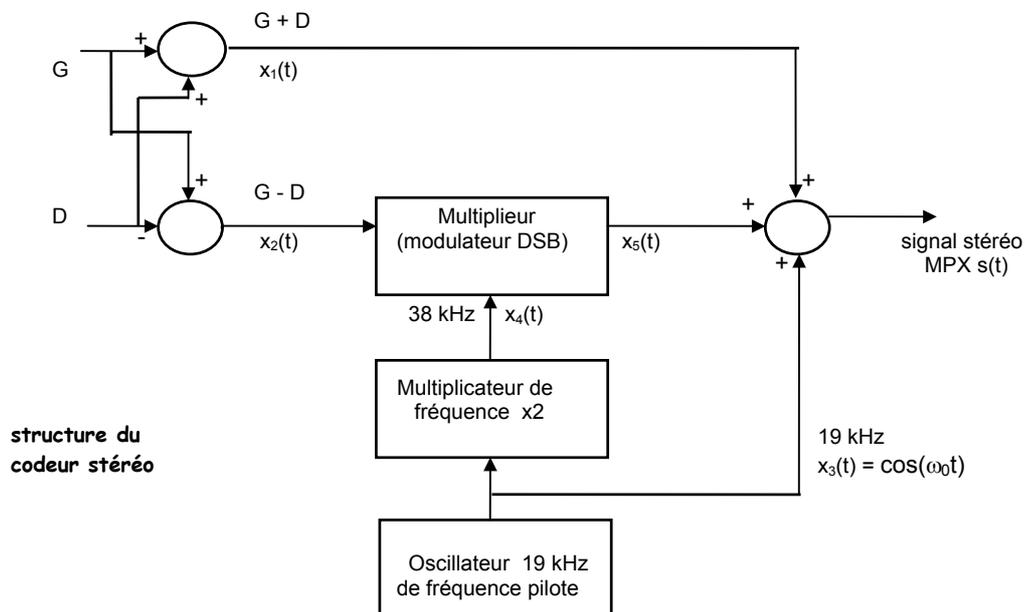
- le canal droit D capté par le microphone placé du côté droit
- le canal gauche G capté par le microphone placé du côté gauche

A l'émission, ces deux signaux D et G sont combinés par le codeur stéréo qui fournit un signal BF stéréo  $s(t)$  appelé aussi **signal MPX** (Multiplex) qui va moduler la porteuse de l'émetteur .

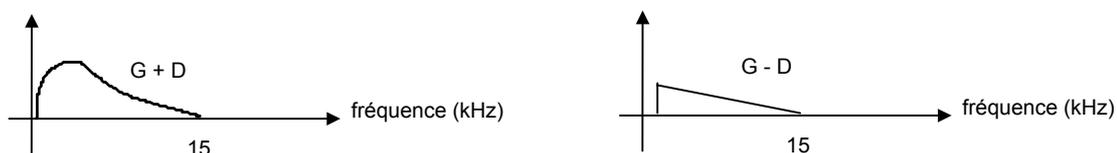


A la réception, ces deux voies devront à nouveau être séparées pour être envoyées sur les haut-parleurs droit et gauche.

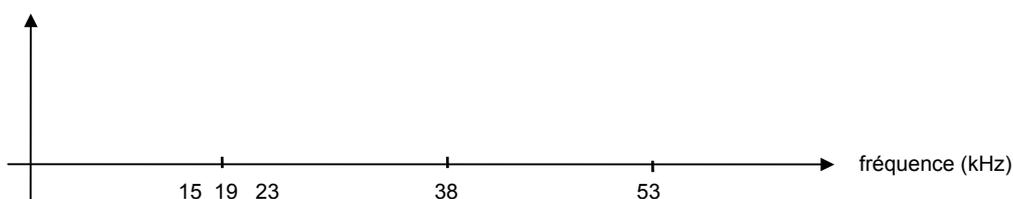
Le codeur stéréo élabore d'abord les signaux « somme »  $x_1(t) = G + D$  et « différence »  $x_2(t) = G - D$  :



Sachant que dans la bande FM le signal audio est limité en fréquence à 15 kHz, les spectres des signaux G+D et G-D ont, à un instant donné, l'allure idéalisée suivante :



1) Dessiner le spectre du signal modulé en bande latérale double  $x_3(t)$  puis celui du signal codé stéréo  $s(t)$  complet.



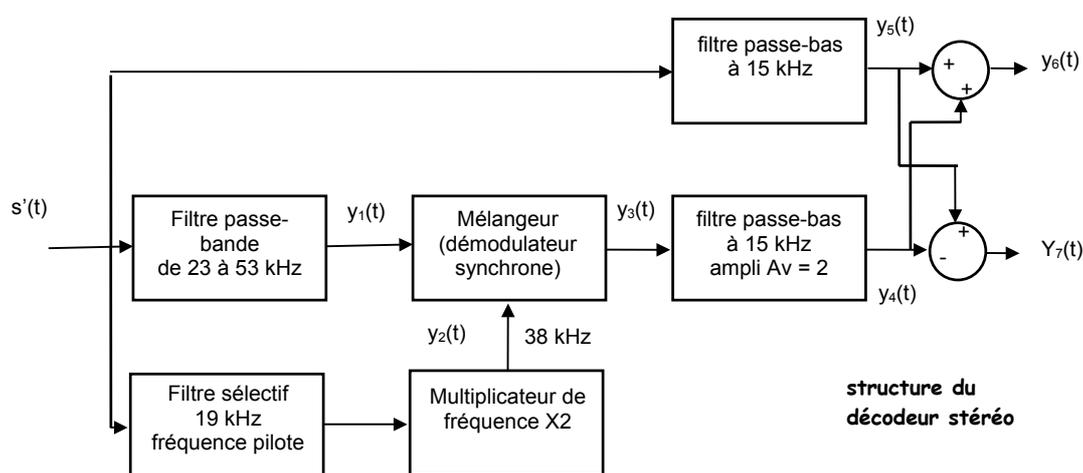
2) En supposant que le multiplicateur de fréquence et le multiplieur n'introduisent ni amplification ni atténuation, donner l'expression mathématique des signaux  $x_4(t)$ ,  $x_5(t)$  et  $s(t)$ .

$x_4(t) =$

$x_5(t) =$

$s(t) =$

3) Ce signal  $s(t)$  est transmis par l'émetteur au récepteur qui fournit à la sortie du démodulateur un signal  $s'(t)$  qu'on supposera identique à  $s(t)$ .



Donner les expressions mathématiques des signaux  $y_1(t)$ ,  $y_2(t)$ ,  $y_3(t)$ ,  $y_4(t)$ ,  $y_5(t)$ ,  $y_6(t)$  et  $y_7(t)$ .

$y_1(t) =$

$y_2(t) =$

$y_3(t) =$

$y_4(t) =$

$y_5(t) =$

$y_6(t) =$

$y_7(t) =$

4) Un récepteur monophonique envoie directement le signal  $s(t)$  sur l'amplificateur audio. Quel est alors le signal entendu par l'auditeur ?

5) Par quel dispositif simple pourrait-on détecter la présence d'une émission « stéréo » pour mettre en service le décodeur ?

## Modulation ASK (amplitude shift keying)



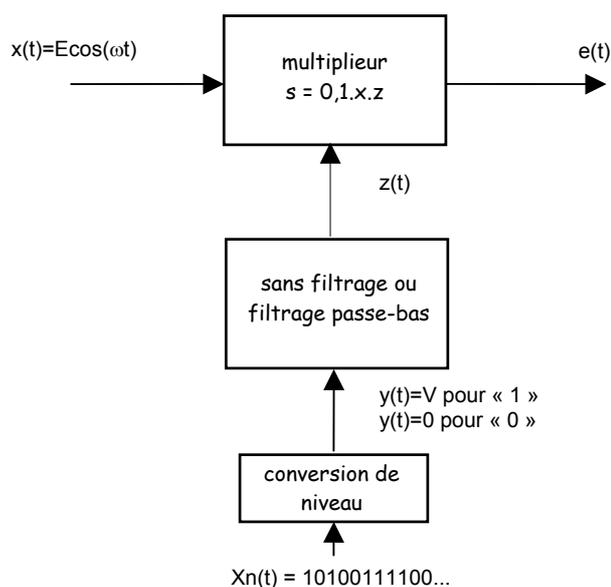
comprendre les bases de la modulation d'amplitude en tout-ou-rien

C'est une technique simple pour moduler une porteuse sinusoïdale par un signal numérique .

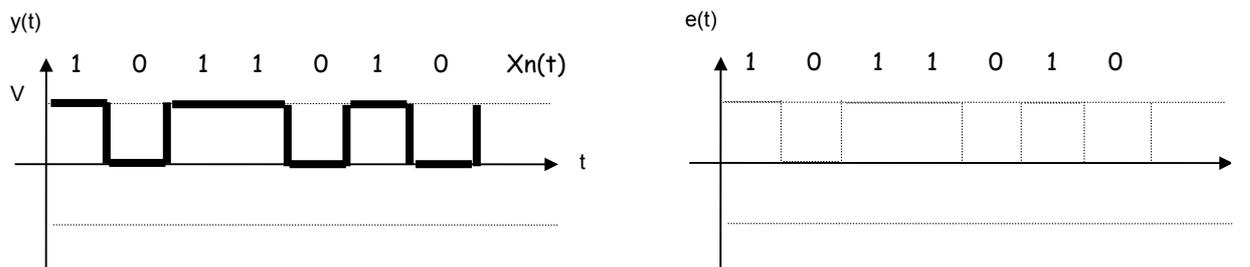
L'indice de modulation est de 100%, ce type de modulation s'appelle donc aussi modulation en tout ou rien ou OOK (On Off Keying)

Dans l'application étudiée :

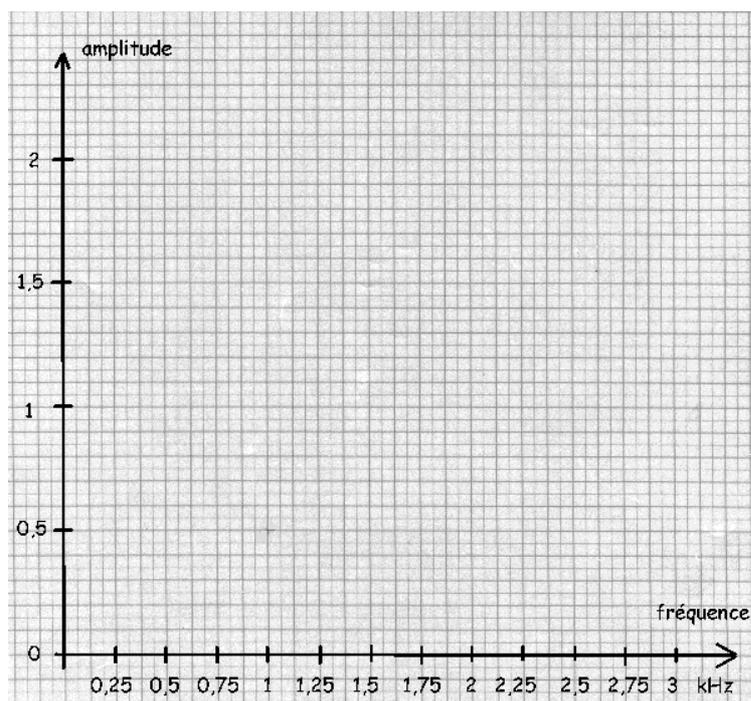
- le signal binaire peut être filtré ou non
- porteuse  $x(t) = 5\cos(\omega t)$  , fréquence  $f = 27$  MHz
- on donne  $V = 2$



1) Le signal modulant n'est pas filtré. Donner l'expression de la porteuse modulée  $e(t)$  en fonction de  $X_n(t)$  et tracer son allure temporelle.



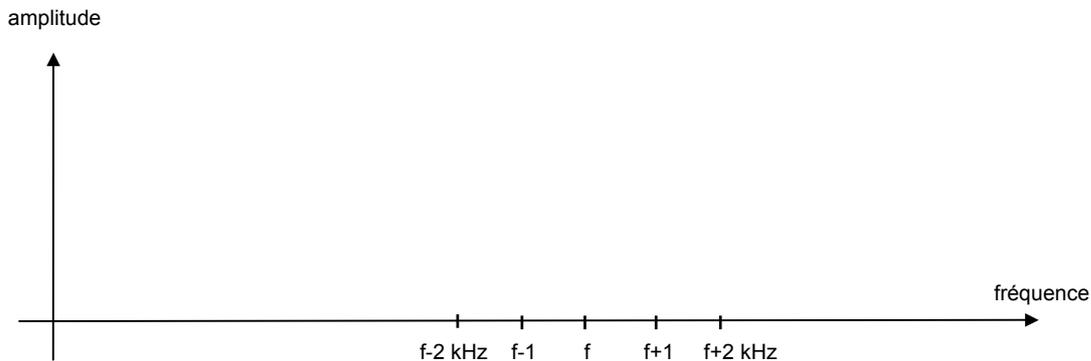
2) Le signal binaire est caractérisé par une largeur de bit de  $\Delta T = 1$  ms et les niveaux 0-5V. Quel est alors le débit binaire  $D$  des informations ? A partir des valeurs du tableau, tracer l'allure du spectre du signal binaire.



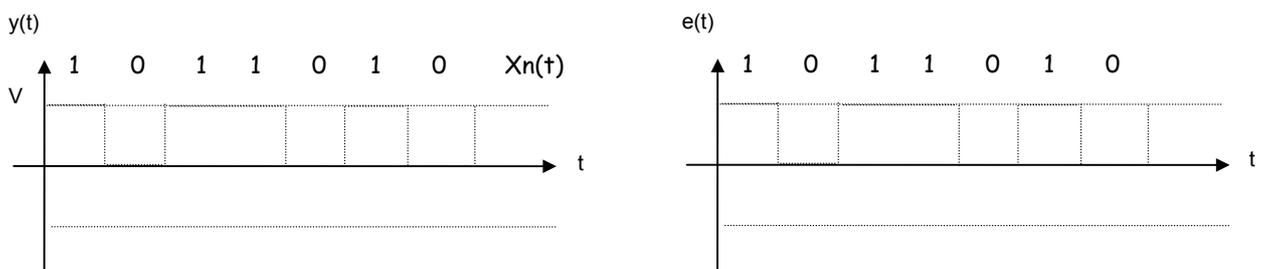
fréquence	amplitude
0	2
0,25	1,8
0,5	1,27
0,75	0,6
1	0
1,25	0,36
1,5	0,42
1,75	0,26
2	0
2,25	0,2
2,5	0,25
2,75	0,16
3	0

3) Quelle est la relation entre les fréquences où le spectre passe par 0 et le débit D ? Quel est le rapport entre les amplitudes du lobe 2 et du lobe 1 ? du lobe 3 et du lobe 1 ? Quelle fonction mathématique décrit l'enveloppe du spectre ?

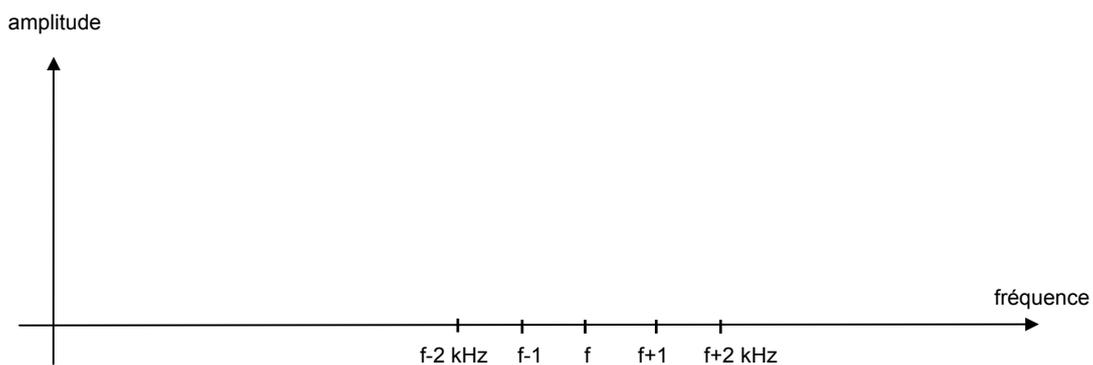
4) En déduire l'allure du spectre du signal modulé ASK. En négligeant les lobes secondaires au-delà du troisième, donner la bande B occupée par ce signal modulé.



5) On choisit d'utiliser un filtre passe-bas ayant une pente très raide au-delà de la coupure à  $f_c = 1$  kHz qui ne conserve pratiquement que le fondamental de  $y(t)$ . Tracer dans ce cas l'allure du signal  $y(t)$  et du signal modulé  $e(t)$ .



6) Tracer dans le cas l'allure du spectre du signal modulé  $e(t)$  et mesurer son nouvel encombrement spectral  $B'$ .



7) **Application** : on désire transmettre des informations numériques à l'aide d'un ensemble « émetteur récepteur » à 27 MHz. Le récepteur à changement de fréquence a une valeur standard de  $f_i=455$  kHz et la largeur du filtre  $f_i$  céramique est de 9 kHz. Quelle sera le débit maximal  $D_{max}$  permis par cette liaison ?

Même question si on travaille avec des modules à 433,92 MHz équipés de filtres  $f_i = 10,7$  MHz de largeur 300 kHz.

► **Signal modulé en amplitude :**

voir cours

► **Porteuse modulée en amplitude :**

1)  $e(t) = E(1+k\cos(\Omega t))\cos(\omega t)$  si le signal modulant est  $s(t) = a\cos(\Omega t)$  indice de modulation  $m = ka$

2) sur 8 carreaux, on a environ 63 périodes de porteuse, soit  $T = 12,7 \mu\text{s}$  et  $f = 1/T \approx 78,7 \text{ kHz}$   
une période de signal modulant dure environ 3,1 carreaux, soit 0,31 ms soit  $F \approx 3,2 \text{ kHz}$

3) l'enveloppe supérieure a pour équation  $x(t) = E(1+m\cos(\Omega t))$

- elle est à son maximum pour  $\cos(\Omega t) = 1$  soit  $X_{\text{max}} = E(1+m) = 4 \text{ V}$
- elle est à son minimum pour  $\cos(\Omega t) = -1$  soit  $X_{\text{min}} = E(1-m) = 1 \text{ V}$
- elle est à sa valeur moyenne pour  $\cos(\Omega t) = 0$  soit  $X_{\text{moy}} = E = 2,5 \text{ V}$

On en déduit :  $E = 2,5 \text{ V}$  et  $m = 0,6$

4)  $e(t) = 2,5(1+0,6\cos(\Omega t))\cos(\omega t) = 2,5\cos(\omega t) + 0,75\cos(\omega-\Omega)t + 0,75\cos(\omega+\Omega)t$

3) le spectre est formé de 3 raies :

- porteuse à 78,7 kHz d'amplitude 2,5
- raie latérale inférieure à 75,5 kHz d'amplitude 0,75
- raie latérale supérieure à 81,9 kHz d'amplitude 0,75

► **Production d'un signal AM :**

1)  $e(t) = 10(1+0,5\cos(\Omega t))\cos(\omega t)$  2) indice de modulation  $m = 0,5$

3) le spectre est formé de 3 raies :

- porteuse à 1 MHz d'amplitude 10
- raie latérale inférieure à 999 kHz d'amplitude 2,5
- raie latérale supérieure à 1,001 MHz d'amplitude 2,5

4) On peut prendre par exemple :  $A=10$ ,  $B=1$ ,  $X=10$

► **Détection crête et filtrage :**

1) on doit avoir  $m < 1$

2) niveau max :  $A_c(1 + m_1 + m_2)$  niveau min :  $A_c(1 - m_1 - m_2)$  condition :  $m_1 + m_2 < 1$

3) D conduit, C se charge / D est bloquée, C se décharge

4)  $RC_1 \gg T \approx 6 \mu\text{s}$   $C_1 = 470 \text{ pF}$  convient bien ( $RC_1 = 22 \mu\text{s}$ )

5)  $s_D(t)$  suit les crêtes négatives

6)  $T(j\omega) = \frac{-R_2/R_1}{1 + jR_2C_2\omega}$  passe-bas du premier ordre avec  $T_0 = 1$  et  $f_c = \frac{1}{2\pi R_2 C_2}$

7) la fréquence de coupure doit être 2 décades en-dessous de 168,5 kHz, soit 1,685 kHz, d'où  $C_2 = 2 \text{ nF}$

8)  $s_E(t)$  suit les crêtes positives

► **Milliohmètre à détection synchrone :**

$$1) x(t) = E \cos(\omega_0 t) \frac{R_{test}}{R_0 + R_{test}} 10000 \cdot (-100) \approx E \cos(\omega_0 t) \frac{R_{test}}{R_0} 10000 \cdot (-100) \approx -100 \cdot R_{test} \cos(\omega_0 t)$$

$$2) y(t) = (-0,1) \cdot x(t) \cdot e(t) = 100 \cdot R_{test} \cos^2(\omega_0 t) = 50 \cdot R_{test} + 50 \cdot R_{test} \cos(2\omega_0 t)$$

le spectre est formé d'une composante continue et d'une raie à 2 kHz

3) C'est un passe-bas du second ordre ayant une cassure à  $\omega_0 = RC$  soit  $f_0 = 1,6$  Hz

A la cassure la transmittance vaut  $T = 0,5$  soit  $-6$ dB, la coupure se trouve donc un peu avant soit  $f_c = 0,5$  à 1 Hz environ

4) le filtre élimine pratiquement la composante à  $2f_0$ , soit  $z(t) \approx 50 \cdot R_{test}$  et donc  $R_{test} = 2 \text{ m}\Omega$  si  $z = 0,1V$

5) à 2 kHz, la transmittance vaut  $T \approx \left(\frac{\omega_0}{\omega}\right)^2 = 6 \cdot 10^{-7}$  et donc l'ondulation  $\Delta V_{out} \approx 50 \cdot R_{test} \cdot 6 \cdot 10^{-7}$

AN : pour  $R_{test} = 40 \text{ m}\Omega$ , on aura :  $V_{out} = 2V$  et  $\Delta V_{out} \approx 1,2 \mu V$

► **Production d'un signal stéréo :**

$$2) x_4(t) = \cos(2\omega_0 t) \quad x_5(t) = x_2(t) \cdot \cos(2\omega_0 t) \quad s(t) = x_1(t) + \cos(2\omega_0 t) + x_4(t) \cdot \cos(2\omega_0 t)$$

$$3) y_1(t) = x_2(t) \cdot \cos(2\omega_0 t) \quad y_2(t) = \cos(2\omega_0 t) \quad y_3(t) = x_2(t) \cdot \cos^2(2\omega_0 t) = 0,5 \cdot x_2(t) + 0,5 \cdot x_2(t) \cdot \cos(4\omega_0 t)$$

$$y_4(t) = x_2(t) = G-D \quad y_5(t) = x_1(t) = G+D \quad y_6(t) = 2 \cdot G \quad y_7(t) = 2 \cdot D$$

4) un récepteur monophonique retransmet le signal  $y_5(t) = G+D$ , soit l'intégralité des informations des 2 canaux

5) la présence d'une émission stéréo est détectée grâce à la présence de la fréquence pilote de 19 kHz (filtre passe-bande ou mieux détecteur de tonalité à PLL)

► **Modulation ASK :**

1)  $e(t) = 0,1E y(t) \cos(\omega t)$  porteuse présente pour émission d'un « 1 » et absente pour un « 0 »

2) Le spectre est en  $\sin X/X$  et passe par 0 à 1 kHz, 2 kHz 3 kHz ...

Le débit binaire est égale à l'inverse de la durée d'un symbole, soit  $D = 1 \text{ kbits/s}$

3) Le spectre passe donc par 0 aux fréquences  $1/D, 2/D, 3/D, \dots$

4) Le spectre du signal ASK est composé :

- d'une raie à la fréquence  $f$  de la porteuse
- de 2 bandes latérales ayant la forme du spectre BF, donc de largeur infinie

Si on se limite au deuxième lobe, la largeur du spectre est  $B = 4 \text{ kHz}$

5) L'enveloppe de la porteuse n'est plus carrée mais les fronts de montée et de descente sont très arrondis.

6) Le spectre du signal BF est limité au seul lobe principal et s'arrête donc à 1 kHz

Le spectre du signal modulé ASK se compose maintenant :

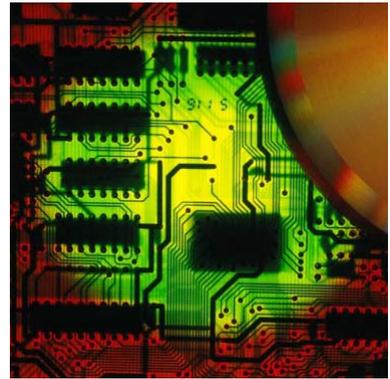
- d'une raie à la fréquence  $f$  de la porteuse
- de 2 bandes latérales ayant la forme du spectre BF, donc de largeur 1 kHz de part et d'autre de  $f$

Le spectre a une largeur minimal, formé d'une seule « bosse » de largeur  $B' = 2 \text{ kHz}$ .

7)

- avec une  $f_i = 455 \text{ kHz}$ , la largeur de bande fixée par le filtre de fréquence intermédiaire est de  $B = 9 \text{ kHz}$  : le débit binaire est donc limité à  $D \approx B/2 = 4,5 \text{ kbits/s}$
- avec une  $f_i = 10,7 \text{ MHz}$ , la largeur de bande fixée par le filtre  $f_i$  est de  $B = 300 \text{ kHz}$  : le débit binaire est donc limité à  $D \approx B/2 = 150 \text{ kbits/s}$

# Questionnaire



jean-philippe muller



## Questions

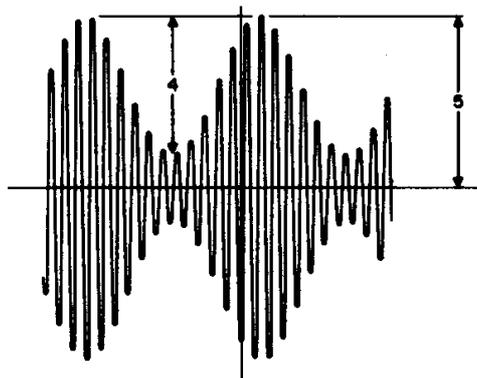
**1** Propriétés générales des télécommunications :

- |   | Vrai                     | Faux                     |
|---|--------------------------|--------------------------|
| a) le support d'une transmission radio est une onde électromagnétique   | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| b) une antenne d'émission produit en son voisinage des champs électrique et magnétique qui varient à la même fréquence que le signal appliqué à l'antenne | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| c) la modulation de la porteuse permet d'adapter sa portée au relief terrestre  | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| d) chaque émetteur est caractérisé par une fréquence de porteuse différente   | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| e) à la réception, on peut sélectionner un émetteur particulier à l'aide d'un filtre sélectif   | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| f) plus son antenne est longue, plus la portée d'un émetteur est importante   | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| g) la longueur d'onde est toujours à peu près égale à la portée   | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |

**2** Soit le signal AM :  $e(t) = 5(1 + 0,7\cos(10^3t)) \cos(10^6t)$

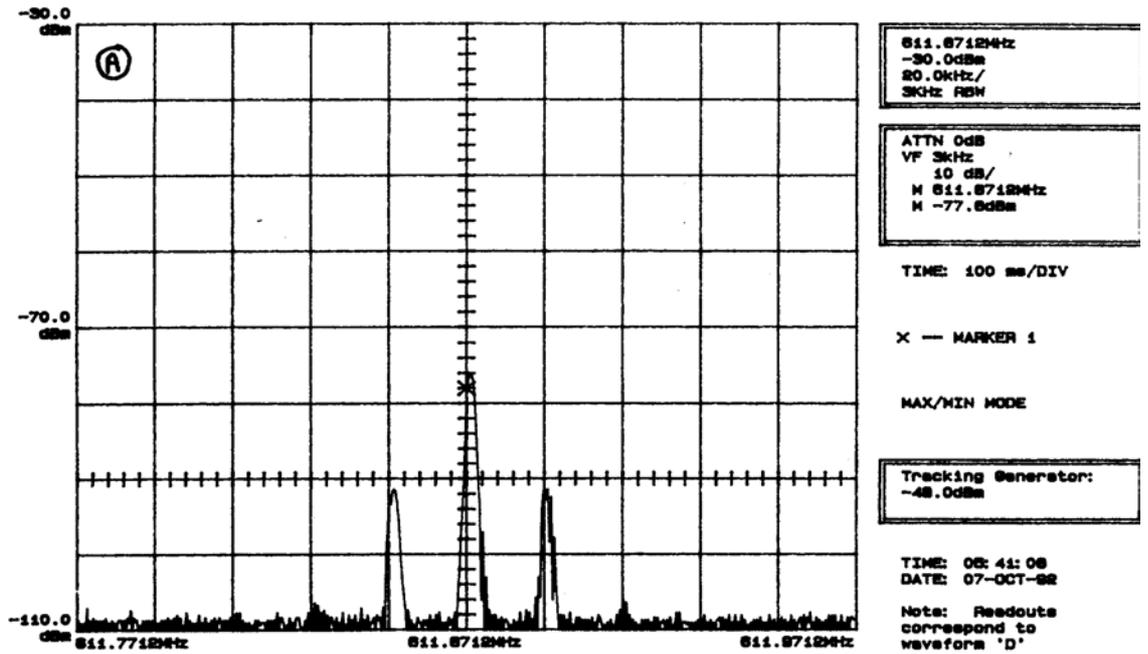
- |  | Vrai                     | Faux                     |
|--|--------------------------|--------------------------|
| a) la fréquence de la porteuse est de 1 MHz            | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| b) le signal modulant est carré et de fréquence 160 Hz | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| c) l'indice de modulation est $m=0,7$                  | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| d) la porteuse a une amplitude de 10 V crête-crête     | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |

**3** Un signal AM a une fréquence de porteuse de 100 kHz, une fréquence modulante de 4 kHz, une puissance d'émission de 150 kW et son oscillogramme est le suivant :



- |  | Vrai                     | Faux                     |
|--|--------------------------|--------------------------|
| a) ce signal ne contient que les fréquences 100 kHz et 104 kHz | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| b) le signal occupe une bande de 8 kHz                         | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| c) l'indice de modulation est de $m=0,8$                       | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| d) la puissance de la porteuse est de 123 kW                   | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| e) la puissance dans une des raies latérales est de 13,5 kW    | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |

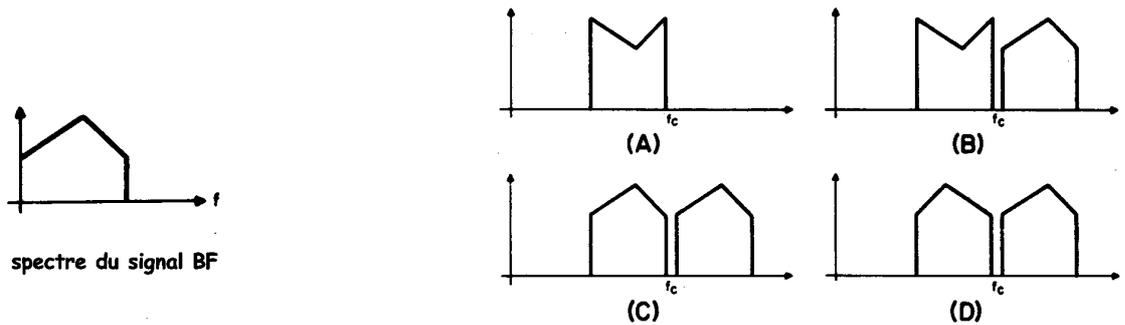
4 Le spectre d'un signal AM a l'allure suivante (20kHz/carreau) :



- a) la porteuse est à une fréquence de 511,87 MHz
- b) le signal modulant est sinusoïdal
- c) la fréquence modulante est de 10 kHz
- d) l'indice de modulation vaut environ 0,32

Vrai	Faux
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

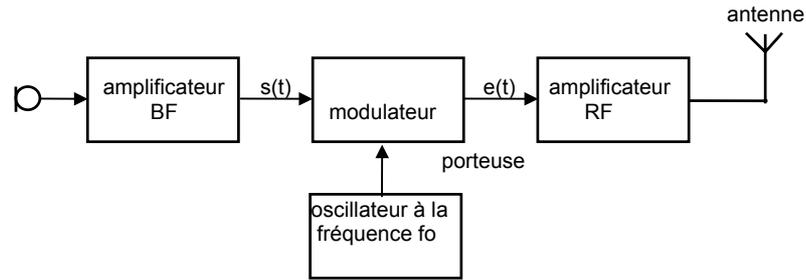
5 Un signal BF module en amplitude une porteuse de fréquence  $f_c$  et le spectre de la porteuse modulée correspond à l'un des 4 dessins ci-dessous :



- a) le spectre du signal modulé est en A
- b) le spectre du signal modulé est en B
- c) le spectre du signal modulé est en C
- d) le spectre du signal modulé est en D
- e) il s'agit d'une modulation AM sans porteuse
- f) ce type de modulation est plus économique en puissance que la AM classique
- g) il s'agit d'une modulation en bande latérale double

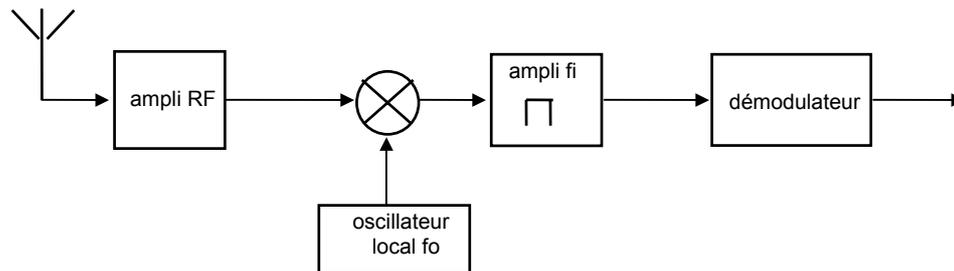
Vrai	Faux
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

**6** Un émetteur AM à 4 MHz a la structure classique suivante, le signal BF étant limité à 15 kHz :



- |  | Vrai                     | Faux                     |
|--|--------------------------|--------------------------|
| a) c'est l'oscillateur $f_0$ qui fournit la fréquence de porteuse à 4 MHz      | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| b) le modulateur peut être un simple multiplieur                               | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| c) le modulateur peut être un ampli dont le gain est commandé par le signal BF | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| d) l'amplificateur RF doit être très sélectif ( $B < 1$ kHz)                   | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| e) l'amplificateur RF doit avoir une bande passante de 15 KHz                  | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| f) une antenne de longueur 1m est une bonne antenne pour cet émetteur          | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |

**7** Un récepteur AM est prévu pour recevoir la fréquence de 28 MHz, avec un oscillateur local placé en-dessous de la fréquence à recevoir et une  $f_i$  à 455 kHz.

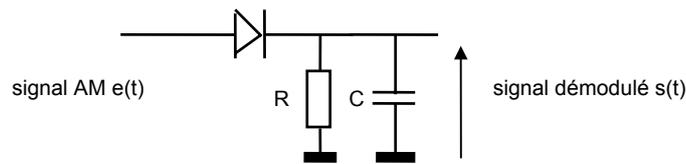


- |   | Vrai                     | Faux                     |
|---|--------------------------|--------------------------|
| a) l'oscillateur local doit être à 27,545 MHz   | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| b) la fréquence image est alors de 28,455 MHz   | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| c) le démodulateur peut être un démodulateur crête ou synchrone   | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| d) ces deux démodulateurs ont exactement les mêmes propriétés   | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| e) si on se trouve à proximité de l'émetteur, on risque « de saturer les amplis et donc d'écrêter le signal et perdre la modulation | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| f) la solution à ce problème est le Contrôle Automatique de Fréquence ou CAF  | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |

**8** Le circuit de contrôle automatique de gain du récepteur AM

- |   | Vrai                     | Faux                     |
|---|--------------------------|--------------------------|
| a) remplace le contrôle de volume audio manuel  | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| b) régule l'amplification RF et fi  | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| c) permet un bon fonctionnement du détecteur crête en maintenant un niveau à peu près constant à son entrée | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| d) évite la saturation des amplificateurs RF et fi  | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| e) permet de rester calé sur un émetteur  | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |

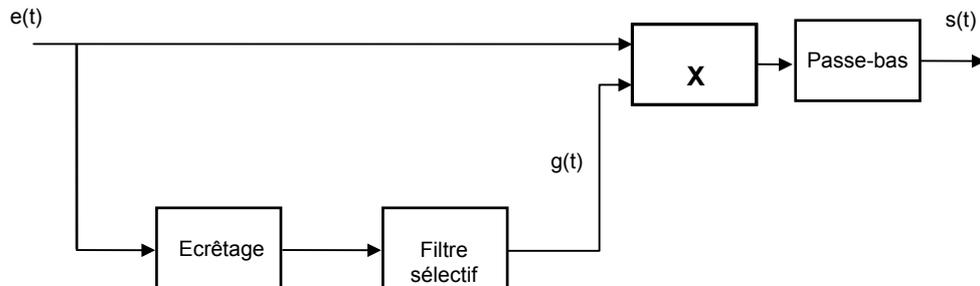
**9** Dans le montage détecteur crête ci-dessous :



- a) le choix de RC dépend des fréquences de la porteuse et de la BF
- b) n'importe quel type de diode convient
- c) il vaut mieux prendre une diode au germanium à faible seuil
- d) la diode conduit durant toute l'alternance positive de la porteuse
- e) la sortie  $s(t)$  suit à peu près l'enveloppe supérieure de la porteuse

Vrai	Faux
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

**10** On applique un signal AM  $e(t)$  à l'entrée du montage ci-dessous :



- a) il s'agit un modulateur AM
- b) il s'agit d'un circuit de contrôle automatique de gain
- c) c'est un démodulateur synchrone
- d) l'ensemble écrêtage-filtre constitue un circuit d'extraction de porteuse
- e) le signal  $g(t)$  a la même forme que  $e(t)$ , mais pas la même fréquence
- f) le signal de sortie  $s(t)$  correspond exactement à l'enveloppe supérieure du signal

Vrai	Faux
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

**11** Propriétés de la modulation AM numérique :

- a) en AM comme dans toutes les autres communications numériques, le signal binaire est filtré par un passe-bas avant d'être transmis
- b) le filtrage du signal modulant permet d'augmenter la puissance du signal émis
- c) le filtrage du signal modulant diminue l'encombrement spectral du signal émis
- d) un bon filtrage limite le spectre BF à une fréquence  $F$  égale au débit  $D$
- e) dans ce cas, l'encombrement spectral est égal au débit

Vrai	Faux
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>



## Réponses

N°	Réponses justes	Commentaires
1	a, b, d, e	f) la longueur de l'antenne est adaptée à la fréquence de travail (souvent $\lambda/4$ ) g) la portée dépend de la puissance émise, la longueur d'onde de la fréquence. Ces deux choses n'ont rien à voir l'une avec l'autre.
2	c, d	b) le signal modulant est visiblement sinusoïdal
3	b, d, e	a) une porteuse $f$ modulée par un signal sinusoïdal $F$ contient $f$ , $f+F$ et $f-F$ b) l'enveloppe varie entre $E(1+m)=5V$ et $E(1-m)=1V$ , soit en faisant le rapport $m=0,66$ d) $P_{totale}=P_{porteuse}+P_{raies\ lat} = P_{porteuse} + P_{porteuse} \cdot m^2/4 = 150\ kW$ soit $P_{porteuse} = 123\ kW$
4	a, b, d	d) les 2 raies latérales sont à $-16\text{dB}$ soit $0,16$ par rapport à la porteuse. On a donc $mE/2=0,16E$ d'où $m = 0,32$
5	d, e, f, g	
6	a, b, c	d) e) le signal occupe une largeur de $30\ kHz$ , l'ampli RF doit donc avoir au moins cette bande passante f) pour $4\ MHz$ , $\lambda/4 = 18,7\ m$ , une antenne de $1\ m$ est donc beaucoup trop courte
7	a, c, e	b) la fréquence image est à $f_0-455 = 27,09\ MHz$ d) le démodulateur synchrone est meilleur lorsque le signal reçu est très bruité f) ne pas confondre CAG (gain) et CAF (fréquence) qui compense les éventuelles dérives de l'oscillateur local et maintient le récepteur calé sur la station
8	b, c, d	e) cette fonction est assurée par le contrôle automatique de fréquence
9	a, c, e	d) la diode ne conduit que durant une très brève partie de l'alternance positive pour recharger C
10	c, d, f	e) $g(t)$ est un signal de même fréquence que $e(t)$ , et de même phase, mais d'amplitude constante contrairement à $e(t)$ qui est AM
11	a, c, d	e) la bande occupée est égale à $2F$ soit ici à $2D$ si le signal BF est filtré à $F_{max}=F$