

Module :

analyse spectrale



▶ Diaporama : l'analyse spectrale

▶ Itinéraire

▶ Résumé de cours

- 1- Représentation fréquentielle d'un signal
- 2- Spectre d'un signal périodique
- 3- Décomposition en série de Fourier de signaux usuels
- 4- L'analyseur de spectre BF FFT
- 5- L'analyseur de spectre RF à balayage

▶ Exercices

▶ Corrigés des exercices

▶ Questionnaire : l'analyse spectrale en questions

▶ Réponses du questionnaire

Itinéraire pédagogique : analyse spectrale

► Diaporama :

diapos	contenu
1-3	oscillogramme et spectre
4-5	les instruments
6-10	les différents types de signaux et les outils
11-21	> périodiques : série de Fourier, applications
22-29	> non-périodiques : FFT, effet de fenêtre, applications



► Fondamentaux :

Le spectre d'un signal est la représentation des amplitudes des différentes composantes présentes dans le signal en fonction de la fréquence.

Un signal périodique a un spectre de raies :

- le spectre du signal sinusoïdal pur se réduit à une seule raie
- un signal périodique a un fondamental et des harmoniques **(1)**, donnés par sa décomposition en série de Fourier
- un signal impulsionnel a un spectre de forme particulière, facile à tracer sans calculs **(2)**.

Dans la pratique, le spectre est visualisé sur un analyseur de spectre gradué en général en dBm **(3)**.

Un signal sinusoïdal pur n'existe pas dans la pratique. Il a donc toujours des harmoniques, même en faible quantité. Sa pureté est mesurée par le taux de distorsion harmonique **(4)** et, si on tient compte du bruit, par le SINAD **(5)**.

Le filtrage d'un signal, périodique ou non, modifie son spectre **(6,7)**.

Tout corps (soleil, être vivant, objet) est une source naturelle de rayonnement dont le spectre, toujours très large, dépend de sa température **(8)**.

En **télécommunications** , les émissions, toujours à spectre étroit, se font à des fréquences variées **(9)** allant de 10 kHz à 100 GHz environ. La taille de l'antenne est du même ordre de grandeur que la longueur d'onde du signal émis. Ces émissions sont caractérisées par leur fréquence de porteuse **(10)** et leur largeur ou encombrement spectral **(11)**.

Dans un **dispositif électronique** (ampli, HP...) les distorsions (harmoniques et d'intermodulation) apparaissent lorsque la caractéristique entrée-sortie n'est pas linéaire **(12)**. Une linéarité parfaite est impossible à obtenir !

Dans certains problèmes où tension ou courant ne sont pas sinusoïdaux, la décomposition de Fourier du signal permet de simplifier l'étude en la ramenant à une suite de problèmes plus simples **(13, 14)**.

► Exercices :

- | | |
|--|---|
| 1- spectre d'un signal périodique | 8- sources naturelles de rayonnement |
| 2- spectre d'un signal impulsionnel | 9- spectre électromagnétique |
| 3- utilisation des dBm | 10- spectre de porteuses modulées |
| 4- taux de distorsion | 11- spectre d'un émetteur FM |
| 5- SINAD et qualité | 12- caractéristique et distorsions |
| 6- filtrage et spectre | 13- tension et courant dans un onduleur |
| 7- amélioration de la pureté spectrale | 14- efficacité d'une bobine de lissage |

► Questionnaire :

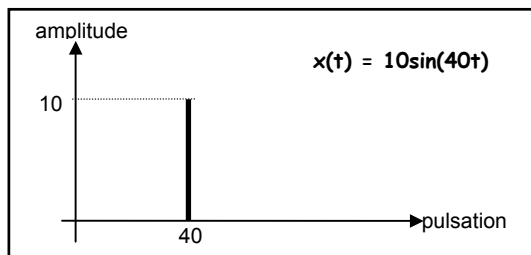
De nombreuses applications simples pour tester vos connaissances dans le domaine.

1) Représentation fréquentielle d'un signal :

Le spectre d'un signal est la représentation en fonction de la fréquence des amplitudes des différentes composantes présentes dans le signal.

⇒ le signal le plus simple du point de vue fréquence est le signal sinusoïdal.

Figure 1.
Spectre d'un signal sinusoïdal

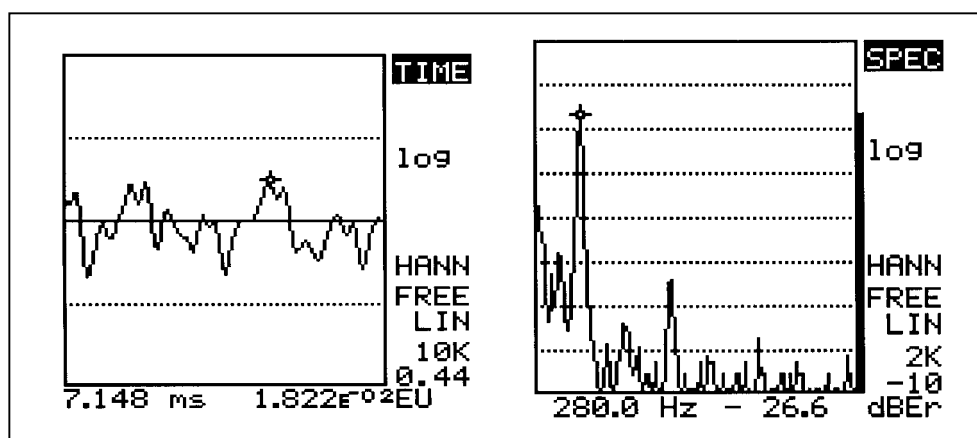


le signal $x(t) = E\sin(\omega t)$

ne contient que la fréquence $f = \frac{\omega}{2\pi}$

⇒ un signal parlé ou musical a un spectre dont l'allure varie constamment au cours du temps :

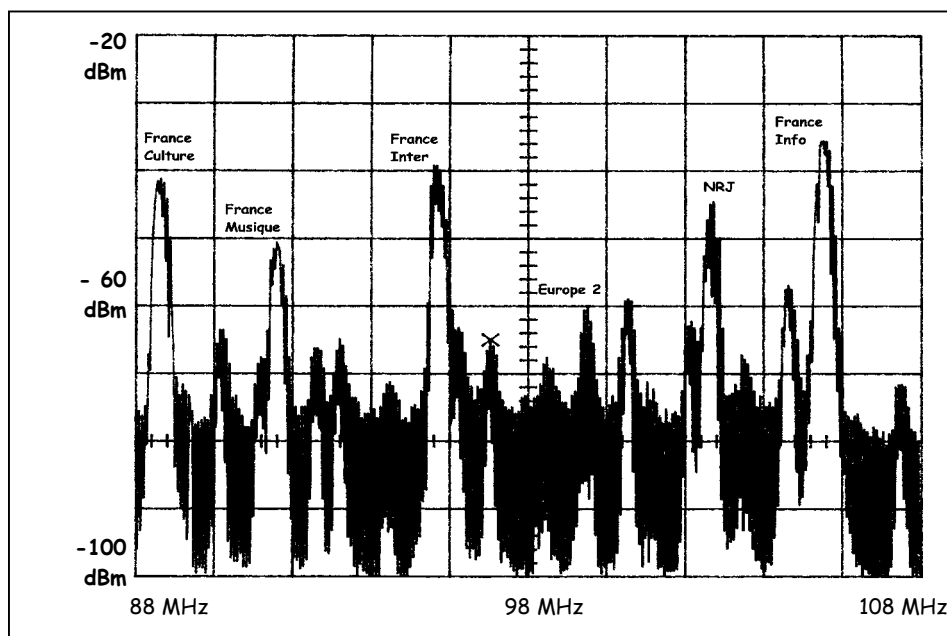
Figure 2.
Allure temporelle d'un signal audio (10 ms du groupe Dire Straits) et son spectre. (analyseur FFT)



C'est un spectre continu qui contient une infinité de raies entre 20 Hz et 20 kHz.

⇒ une antenne branchée sur l'entrée d'un analyseur de spectre permet de visualiser les différentes émissions qu'on peut capter dans une bande donnée :

Figure 3.
Spectre de la bande FM. (analyseur RF à balayage)



L'observation du spectre permet de surveiller le bon fonctionnement des différents émetteurs, de mesurer leur puissance et de détecter les signaux parasites.

2) Spectre d'un signal périodique :

Les signaux peuvent être classés en différentes catégories et leur spectre peut être :

- calculé dans le cas d'un signal périodique ou de forme simple
- visualisé à l'aide d'un analyseur de spectre FFT ou à balayage

La décomposition en série de Fourier permet de calculer le spectre d'un signal périodique.

Si $x(t)$ un signal de forme quelconque, mais périodique de période T_0 , le mathématicien Fourier a démontré que $x(t)$ peut s'écrire sous la forme suivante :

$$\Rightarrow x(t) = X_0 + X_1 \sin(\omega_0 t + \varphi_1) + X_2 \sin(2\omega_0 t + \varphi_2) + X_3 \sin(3\omega_0 t + \varphi_3) + \dots + X_n \sin(n\omega_0 t + \varphi_n) \dots$$

avec

- X_0 = valeur moyenne du signal
- X_1 = amplitude du fondamental
- X_2 = amplitude de l'harmonique 2
-
- X_n = amplitude de l'harmonique n

Il n'existe pas d'harmonique 1 (c'est le fondamental) et l'harmonique n est à la fréquence nf_0 .

Cette décomposition peut aussi s'écrire de la façon suivante :

$$\Rightarrow x(t) = X_0 + A_1 \cos(\omega_0 t) + B_1 \sin(\omega_0 t) + A_2 \cos(2\omega_0 t) + B_2 \sin(2\omega_0 t) \dots + A_n \cos(n\omega_0 t) + B_n \sin(n\omega_0 t) \dots$$

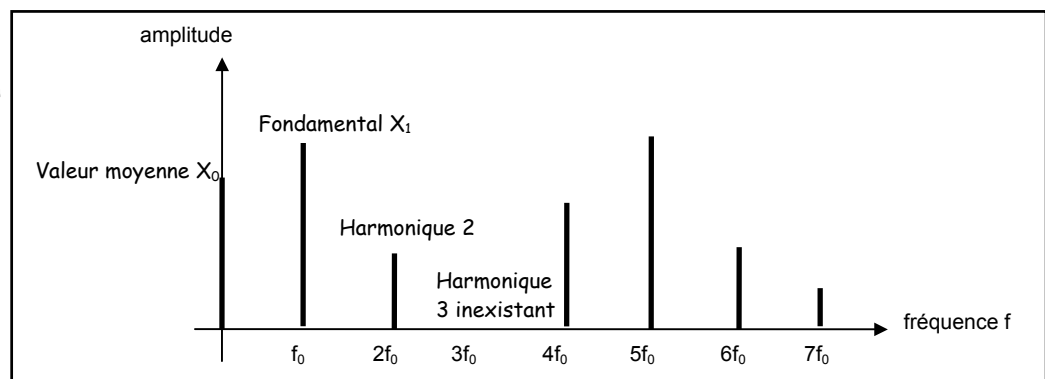
$$\text{avec : } X_0 = \frac{1}{T_0} \int_T x(t) dt \qquad A_n = \frac{2}{T_0} \int_T x(t) \cos(n\omega_0 t) dt \qquad B_n = \frac{2}{T_0} \int_T x(t) \sin(n\omega_0 t) dt$$

Ces décompositions sont équivalentes et on a :

$$X_n^2 = A_n^2 + B_n^2 \qquad \text{et} \qquad \text{tg}(\varphi_n) = B_n / A_n$$

Une fois que la décomposition d'un signal est calculée, on trace le spectre représentant les amplitudes X_i en fonction de la fréquence.

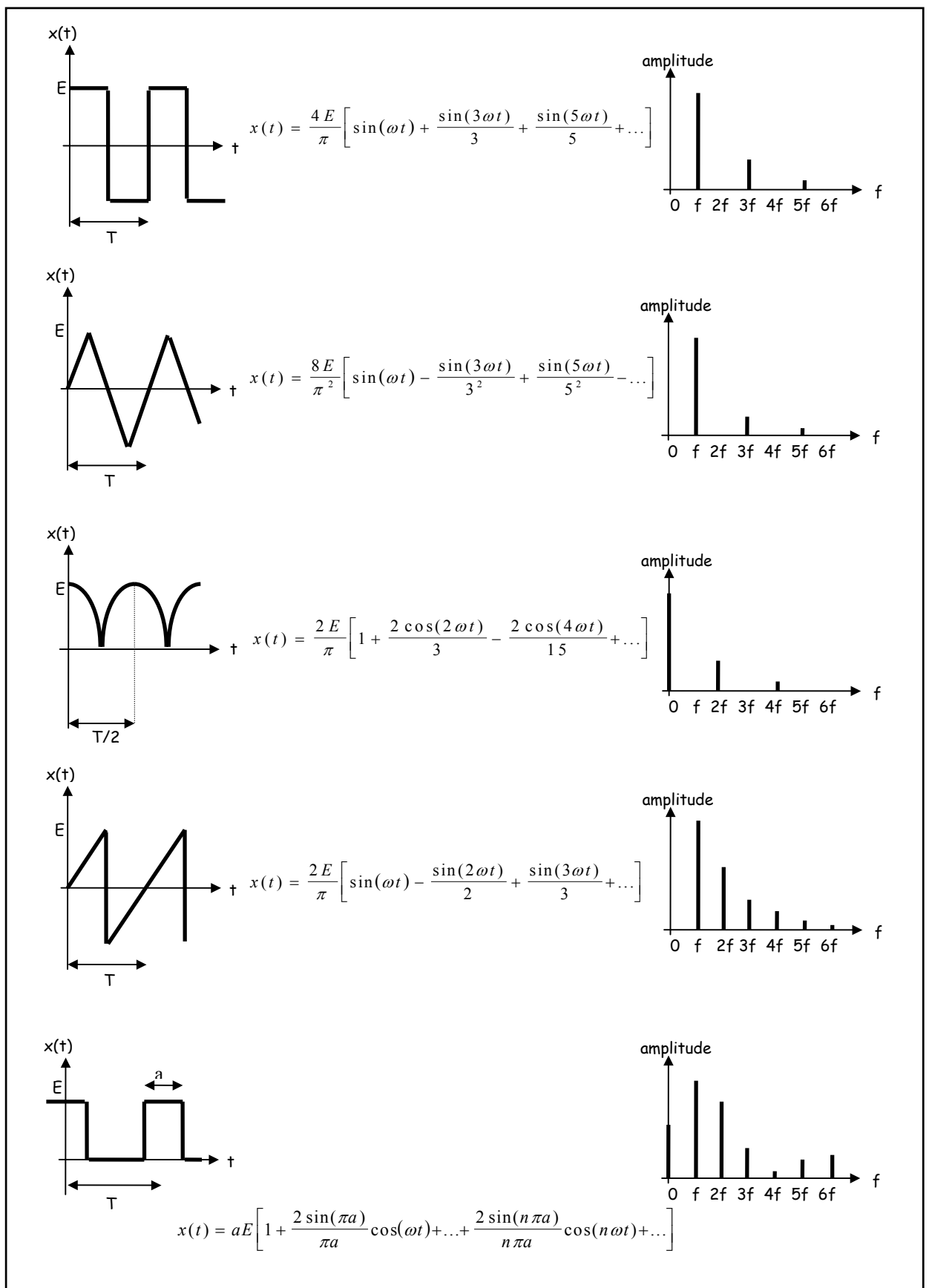
Figure 4.
Allure générale
du spectre d'un
signal
périodique



- le spectre d'un signal périodique est toujours un **spectre de raies** placées aux fréquences $f_0, 2f_0, \dots, nf_0$
- cette allure particulière du spectre caractérise les signaux périodiques
- les fonctions $x(t)$ paires ont un développement qui ne contient que des termes en cosinus
- inversement, les fonctions $x(t)$ impaires ont une décomposition en sinus

Ces remarques utiles permettent souvent d'accélérer le calcul.

3) Décomposition en série de Fourier de signaux usuels :



4) L'analyseur de spectre BF FFT :

Pour les signaux complexes (audio, vidéo, radiofréquence, bruit de fond, etc ...) le calcul du spectre est impossible, mais il est possible de le visualiser à l'aide d'un analyseur FFT.

Pour visualiser le spectre du signal, on l'échantillonne durant un temps T et le convertit en une suite de N valeurs numériques $x_0 = x(0)$, $x_1 = x(T_e)$... $x_n = x(nT_e)$...

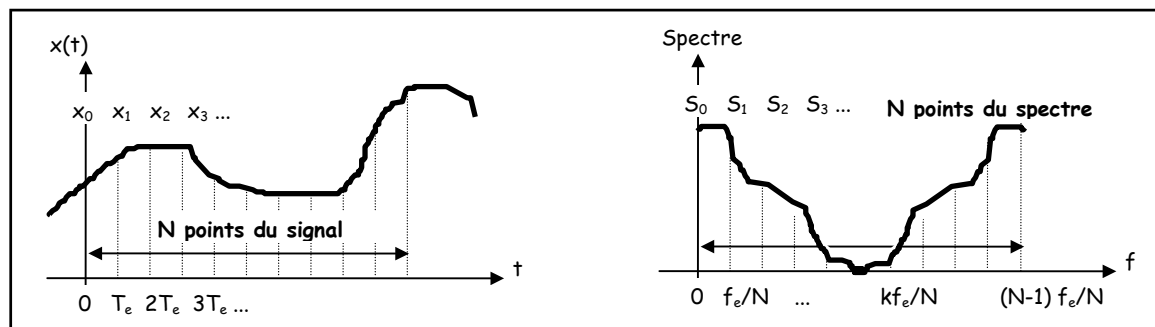
L'échantillonnage lui-même se fait à une fréquence f_e et la prise de N échantillons dure un temps T tel que :

$$T = N.T_e = N/f_e \quad \text{largeur de la fenêtre d'analyse}$$

A partir de ces N échantillons, on peut calculer N points du spectre définis par leur abscisse $f(k)$ et leur ordonnée $S(k)$ en utilisant la transformée de Fourier discrète (TFD) définie par :

- **fréquence** : $f(k) = k.f_e/N$ avec $k = 0, 1, 2 \dots N-1$
- **amplitude** : $S(k) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x(n)e^{-2jn\pi k/N} = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x(n) [\cos(2n\pi.k/N) - j \sin(2n\pi.k/N)]$

Figure 5.
N échantillons
donnent N
points du
spectre



Le spectre du signal échantillonné a des caractéristiques particulières :

- le signal étant échantillonné, le spectre obtenu est forcément symétrique par rapport à $f_e/2$, ce qui veut dire que seuls la première moitié des points calculés est effectivement utilisée pour tracer le spectre
- si on veut un spectre précis, il suffit d'augmenter le nombre de points du signal et donc la durée de l'échantillonnage
- le nombre de calculs et donc la durée du traitement mathématique augmente très vite avec le nombre N d'échantillons

La TFD nécessite de nombreux calculs. Pour 1024 points, il faut effectuer 1048576 additions et multiplications ce qui rend difficile le calcul du spectre en temps réel et limite l'utilisation de cette technique à quelques dizaines de MHz.

Malgré un intérêt évident de la communauté scientifique, il a fallu attendre 1965 et la publication par Cooley et Turkey de leur algorithme mathématique, le fameux **Fast Fourier Transform**, pour disposer d'un procédé de calcul performant, divisant par 100 le temps de calcul.

Remarques :

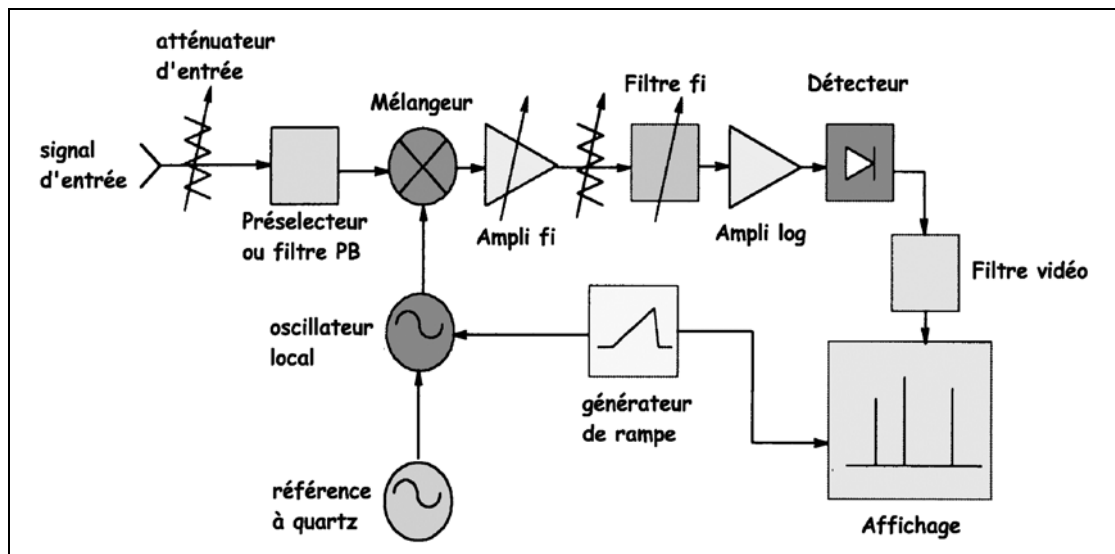
- les analyseurs FFT laissent toujours à l'utilisateur le choix entre différentes fenêtres de pondération du signal (rectangulaire, Hann, Hamming ...)
- ces fenêtres ont une influence sur la forme des raies affichées à l'écran

5) L'analyseur de spectre RF à balayage :

L'analyseur de spectre à balayage permet de visualiser le spectre d'un signal quelconque dans une gamme de fréquences très étendue qui va selon le modèle de 1 kHz à quelques GHz.

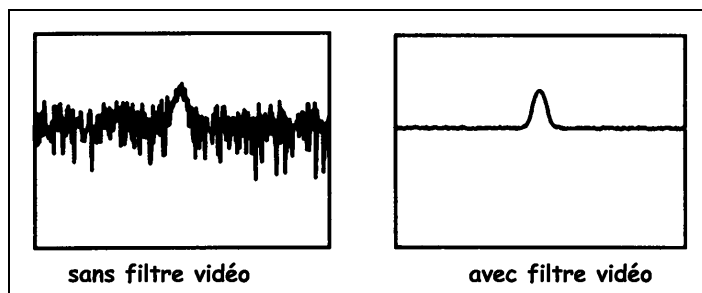
Sa structure est celle d'un récepteur radio, sauf que le balayage de la gamme de fréquence est automatique, et que la sortie n'est pas envoyée sur un haut-parleur mais sur un dispositif d'affichage.

Figure 6.
Structure interne d'un analyseur RF réel.



- l'atténuateur RF permet de contrôler le niveau d'entrée et d'éviter la saturation du mélangeur. Celui-ci multiplie le signal à analyser par un signal sinusoïdal issu d'un oscillateur local f_{lo} et produit les fréquences somme et différence, qui seule nous intéresse
- l'oscillateur local est un VCO balayant une plage de fréquence liée à la plage à analyser. Il est commandé par une rampe qui assure aussi le balayage en X de l'affichage
- en sortie du mélangeur, le signal est amplifié et traverse le filtre f_i passe-bande. Sa largeur s'appelle RBW (resolution bandwidth) et peut être choisie par l'utilisateur parmi plusieurs valeurs
- l'amplificateur logarithmique a une tension de sortie proportionnelle au logarithme de la tension d'entrée, ce qui permet d'avoir sur l'écran un affichage en dBm si on le souhaite. L'amplitude du signal est extraite par le détecteur crête et commande la déviation verticale.
- le filtre vidéo est un passe-bas placé entre le détecteur d'enveloppe et le dispositif d'affichage. Il peut être mis en service pour lisser le signal affiché sur l'écran.

Figure 7.
Rôle du filtre vidéo



L'utilisation d'un analyseur à balayage nécessite un certain nombre de **réglages** :

- choix de la **fréquence centrale** qui correspondra au centre de l'écran
- choix de la **déviaton en fréquence** (span) qui définit la plage de fréquence affichée à l'écran
- choix de la **largeur du filtre d'analyse** ou RBW
- réglage de l'**atténuateur d'entrée** par le choix du niveau de référence
- choix de l'utilisation du **filtre vidéo** si on souhaite lisser le signal affiché

Dans les analyseurs modernes, tous les autres réglages sont effectués automatiquement par le logiciel de gestion de l'analyseur.

Exercices d'application



jean-philippe muller

Spectre d'un signal périodique



Connaître les propriétés du spectre d'un signal périodique

Si $x(t)$ un signal de forme quelconque, mais périodique de fréquence f_0 , le mathématicien Fourier a démontré que $x(t)$ peut s'écrire sous la forme suivante :

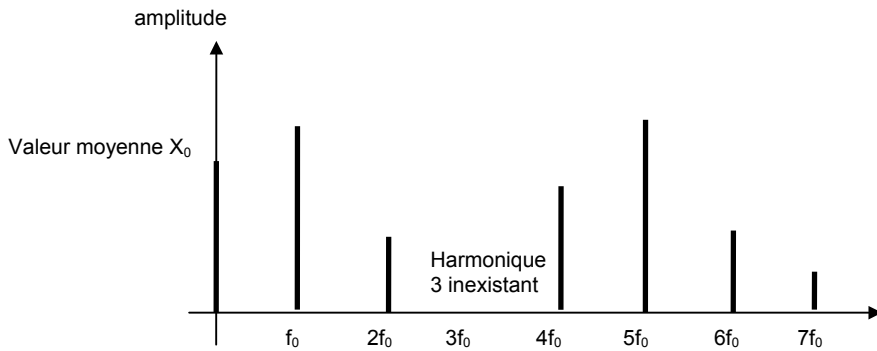
$$x(t) = X_0 + X_1 \sin(\omega_0 t + \varphi_1) + X_2 \sin(2\omega_0 t + \varphi_2) + X_3 \sin(3\omega_0 t + \varphi_3) + \dots + X_n \sin(n\omega_0 t + \varphi_n) \dots$$

Un signal périodique est donc toujours une somme infinie d'une tension continue et de sinusoïdes :

- X_0 = valeur moyenne du signal
- X_1 = amplitude du fondamental à la fréquence du signal f_0
-
- X_n = amplitude de l'harmonique n à la fréquence $n.f_0$
-

Remarques :

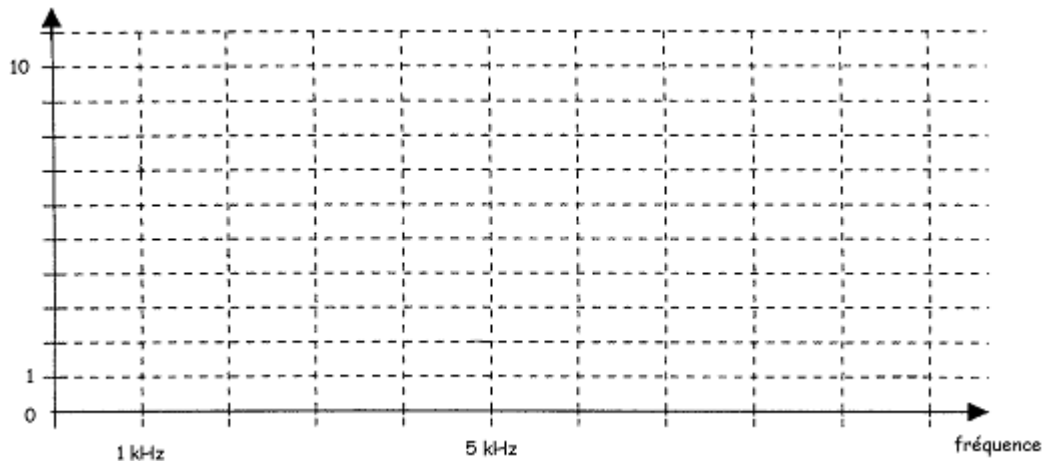
- il n'existe pas d'harmonique 1 (c'est le fondamental) et l'harmonique n est à la fréquence nf_0
- si $\varphi = \pi/2$, le sinus devient un cosinus
- le spectre est donc toujours un **spectre de raies** équidistantes placées aux fréquences $f_0, 2f_0, \dots, nf_0$



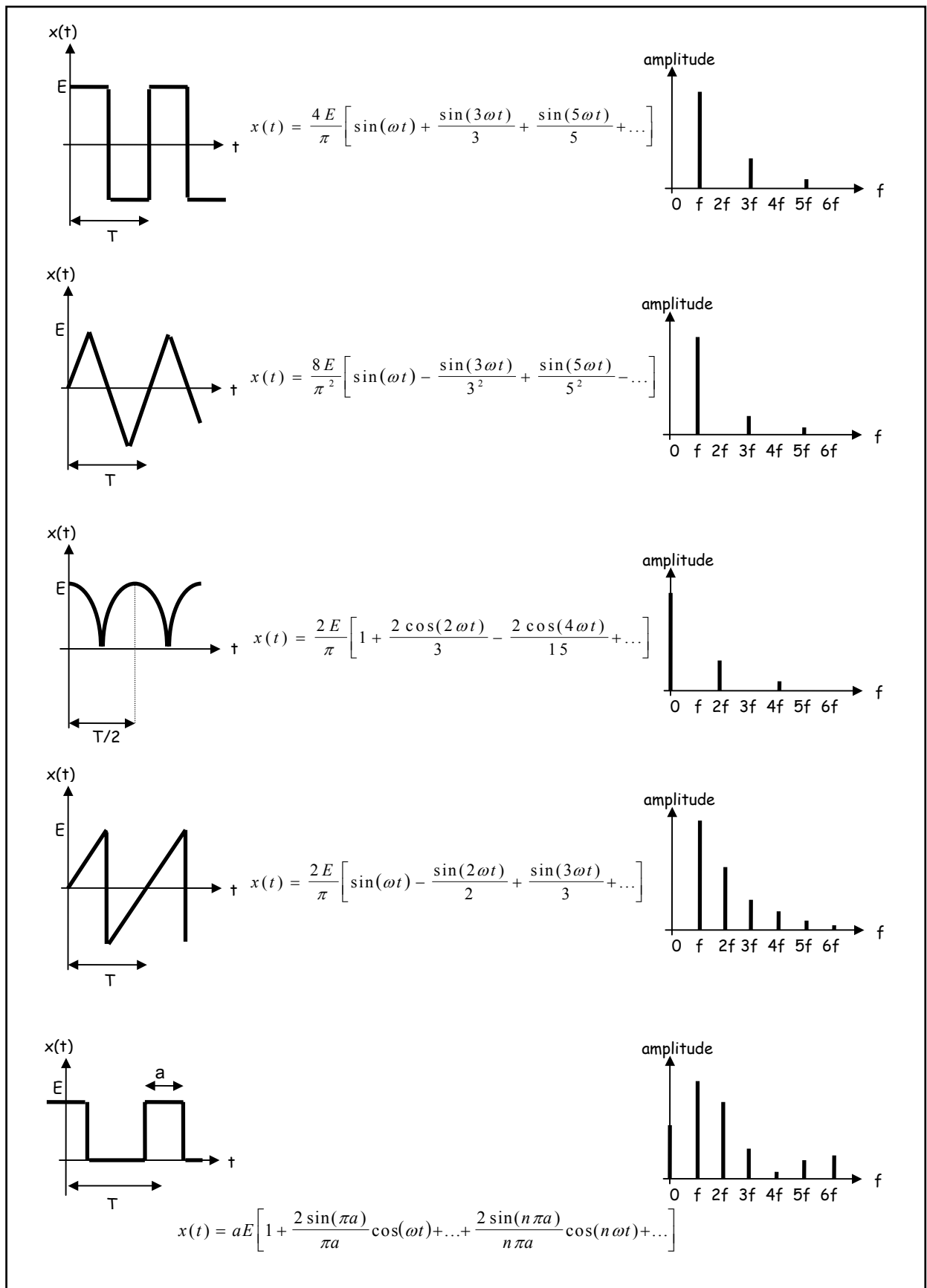
1) Un signal en **dent de scie** a une fréquence de 2 kHz et varie entre $-15V$ et $+15V$. Calculer les valeurs de la composante continue X_0 , du fondamental F et des harmoniques H_2 à H_5 de ce signal entre 0 et 10 kHz :

	X_0	F	H_2	H_3	H_4	H_5
fréquence						
amplitude						

2) Tracer le spectre du signal :



Annexe : décomposition en série de Fourier des signaux usuels

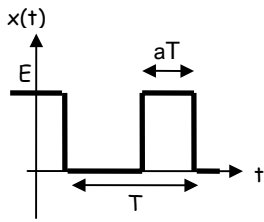


Spectre d'un signal périodique impulsionnel



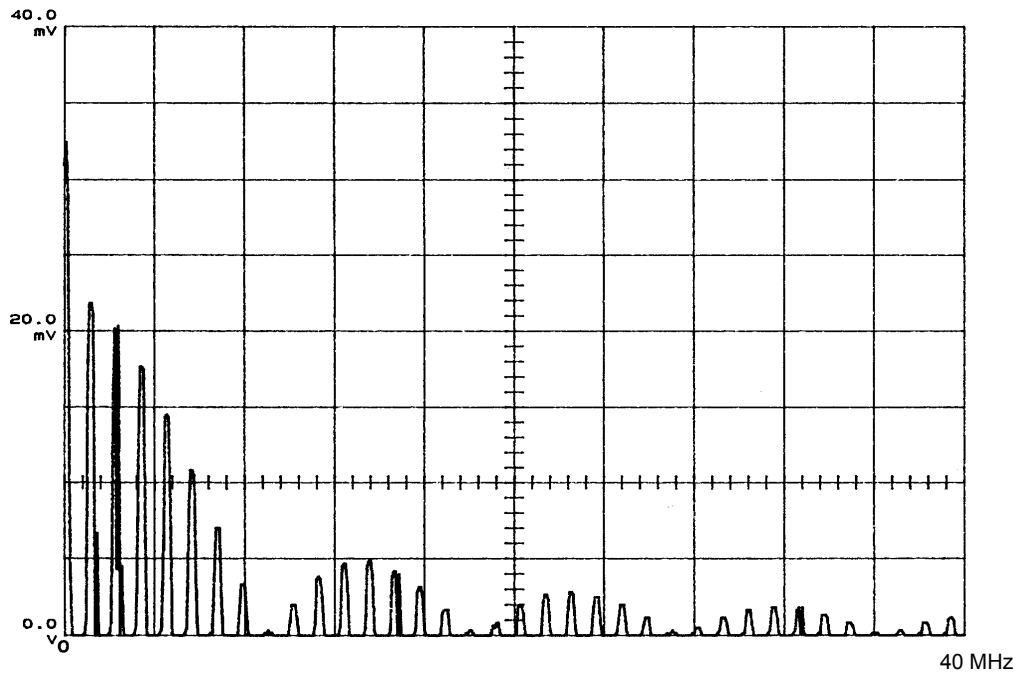
Connaître les propriétés du spectre d'un signal périodique impulsionnel

On a enregistré le spectre d'un signal impulsionnel dont on rappelle la forme et la décomposition de Fourier :



$$x(t) = aE \left[1 + \frac{2\sin(\pi a)}{\pi a} \cos(\omega_0 t) + \dots + \frac{2\sin(n\pi a)}{n\pi a} \cos(n\omega_0 t) + \dots \right]$$

L'allure du spectre entre 0 et 40 MHz (échelle 4 MHz/carreau) est la suivante :



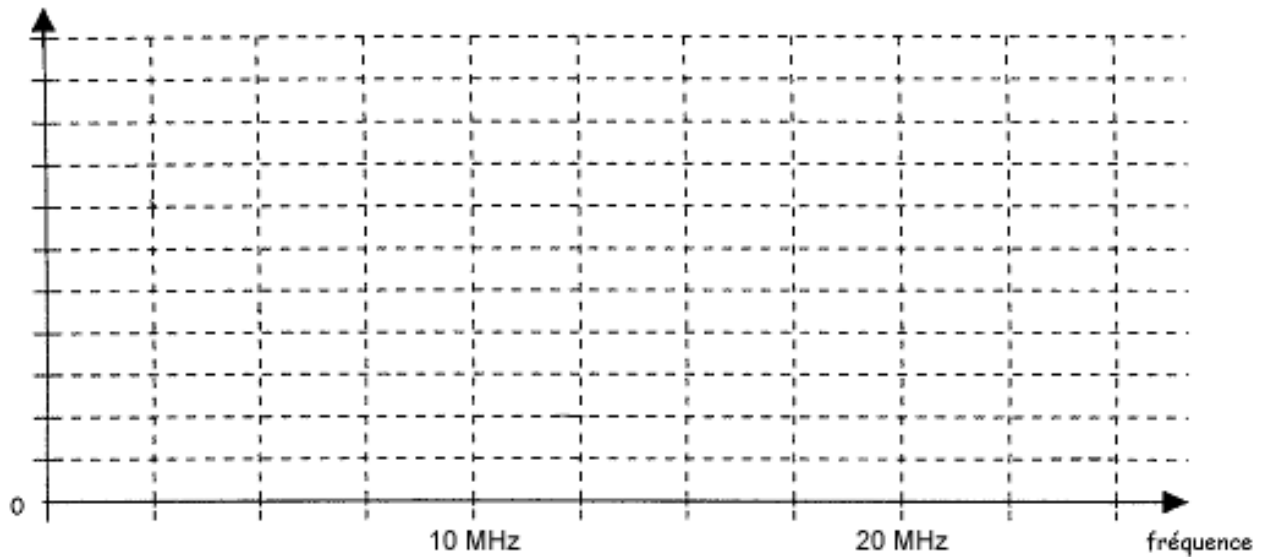
- 1) Marquer sur ce spectre où se trouvent la valeur moyenne, le fondamental et les harmoniques 2, 8 et 32.
- 2) Déterminer graphiquement la fréquence de l'harmonique 32. En déduire la fréquence f_0 du signal et sa période T .
- 3) Donner, en fonction de a , E , n et π l'amplitude de l'harmonique de rang n de ce signal impulsionnel.
- 4) En utilisant le fait que l'harmonique de rang $n = 8$ a une amplitude nulle, calculer, à l'aide de la formule précédente, la valeur du rapport cyclique a .
- 5) Calculer la largeur aT des impulsions et comparer l'inverse $1/aT$ aux fréquences où les harmoniques sont nuls.

6) Application :

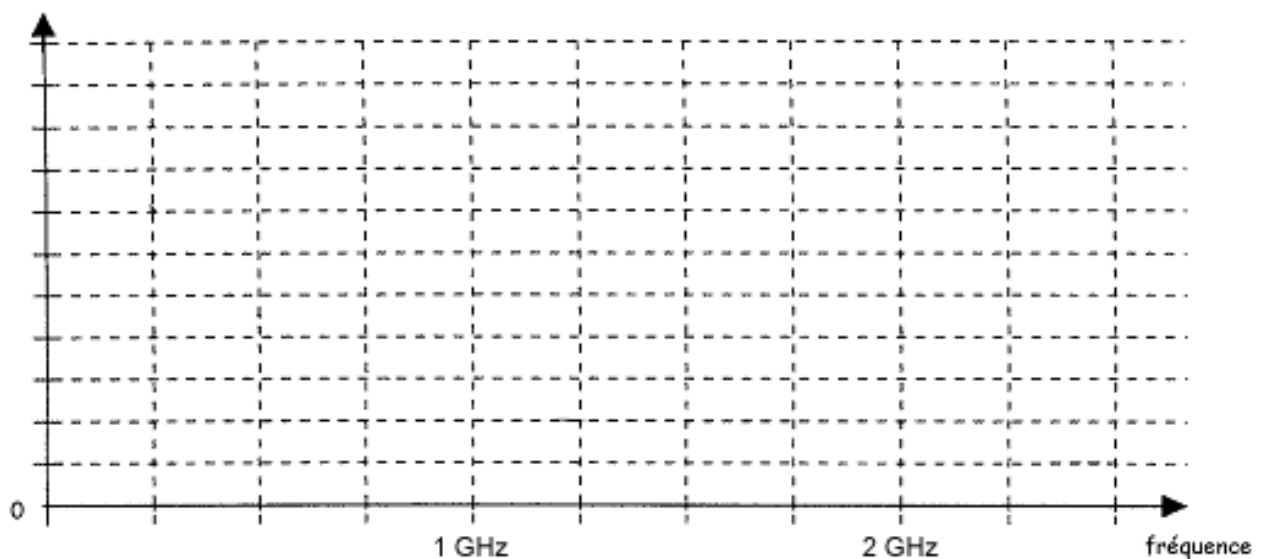
En utilisant les résultats précédents, on peut facilement tracer l'allure du spectre de n'importe quel train d'impulsions :

- l'inverse de la largeur de l'impulsion donne les fréquences où l'enveloppe du spectre passe par 0
- la fréquence de répétition de l'impulsion donne les fréquences des raies

Tracer l'allure du spectre d'un train d'impulsions de largeur 100 ns se répétant à la fréquence de 1 kHz.



Que devient ce spectre si les impulsions sont encore plus fines (par exemple 1 ns) ?



Conclure quant aux perturbations électromagnétiques créées par des phénomènes électriques très brefs (étincelles, éclairs, décharges électrostatiques etc...)

Utilisation des dBm



comprendre l'intérêt et savoir utiliser cette unité très courante en analyse spectrale et aux radiofréquences

On définit le niveau d'un signal en dBm par la relation :

$$V_{dBm} = 10 \log \frac{\text{puissance}}{1mW}$$

1) Rappeler la relation donnant la puissance dissipée dans une résistance R aux bornes de laquelle on a une tension sinusoïdale de valeur efficace V. Cette puissance dépend-elle de la fréquence ?

2) Dans le domaine des radiofréquences, les impédances d'entrée et de sortie des dispositifs (amplificateurs, mélangeurs, antennes, filtres ...) ont une valeur normalisée de $R = 50\Omega$. Pour cette valeur de R, établir la relation permettant de passer d'une tension en volts à la tension en dBm et montrer que :

$$V_{dBm} = 20 \cdot \log(V) + 13$$

3) Pour une résistance de référence de $R = 50\Omega$, calculer dans les deux cas le niveau correspondant en dBm :

\Rightarrow pour $V = 100V$ $V_{dBm} =$

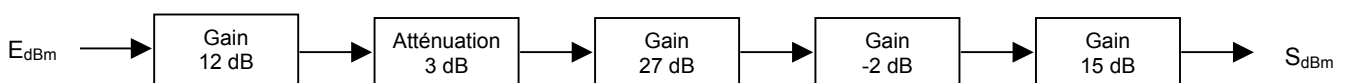
\Rightarrow pour $V = 1\mu V$ $V_{dBm} =$

Intérêt 1 : le niveau en dBm s'exprime par un nombre simple (3 chiffres au maximum)

4) On injecte à l'entrée d'un amplificateur caractérisé par son amplification en tension A_v un signal sinusoïdal de niveau E_{dBm} . Montrer que le niveau de sortie S_{dBm} se calcule très simplement en fonction du niveau d'entrée E_{dBm} et du gain G de l'amplificateur par :



5) Application : calculer le niveau S_{dBm} en sortie de la chaîne si on a $E_{dBm} = -78$ dBm à l'entrée



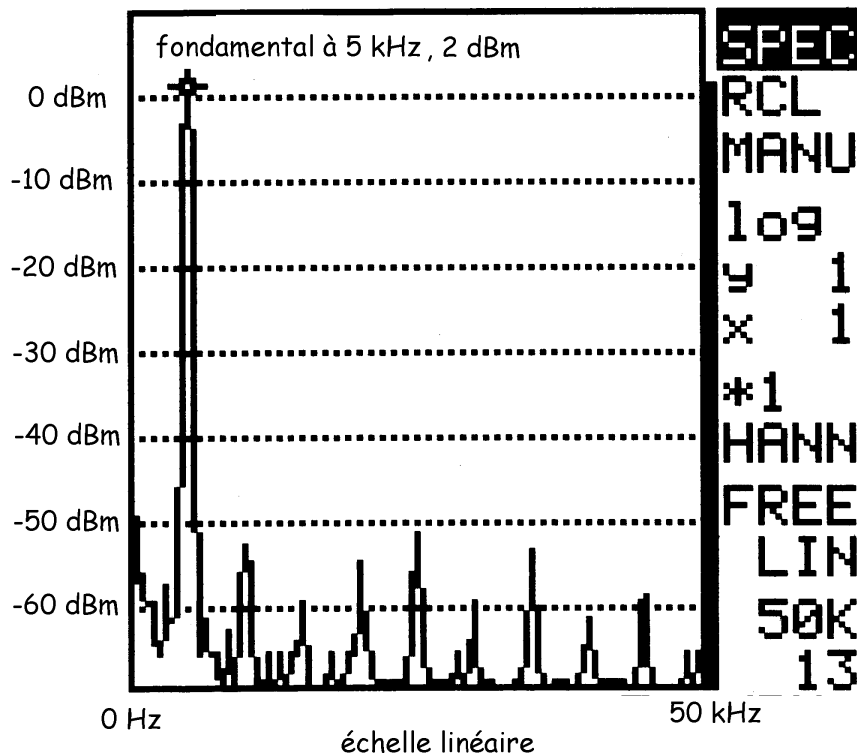
Intérêt 2 : le niveau de sortie d'une cascade d'étages se calcule très facilement

Taux de distorsion d'un signal



apprendre à calculer le taux de distorsion d'un signal à partir du spectre

L'analyse du spectre en sortie d'un générateur basse-fréquence Métrix du laboratoire fournissant une tension sinusoïdale à la fréquence 5 kHz a donné le résultat suivant :



1- Calculer les valeurs efficaces du fondamental F et des 8 premiers harmoniques :

Composante	amplitude en dBm	amplitude en mV
Fondamental	2	
Harmonique 2		
Harmonique 3		
Harmonique 4		
Harmonique 5		
Harmonique 6		
Harmonique 7		
Harmonique 8		
Harmonique 9		

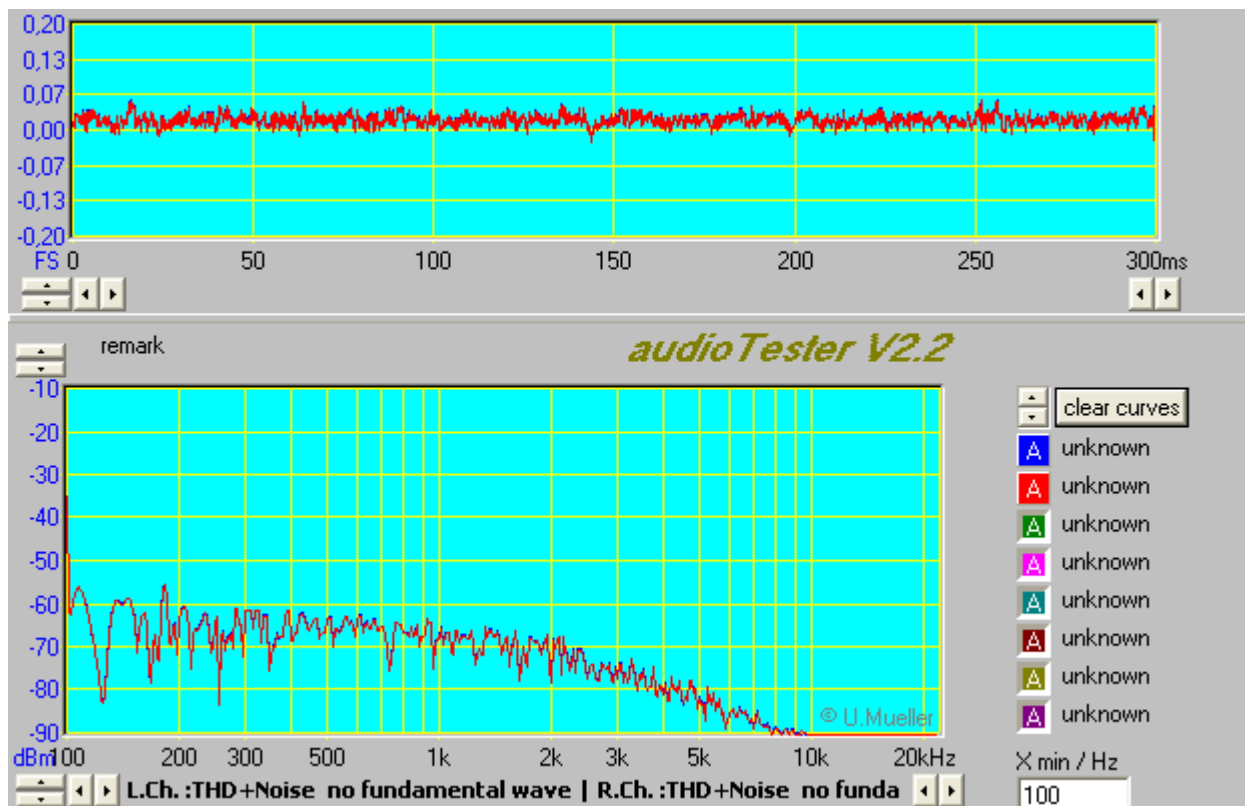
2- En déduire le taux de distorsion d du signal en sortie du générateur.

SINAD et qualité d'un signal audio



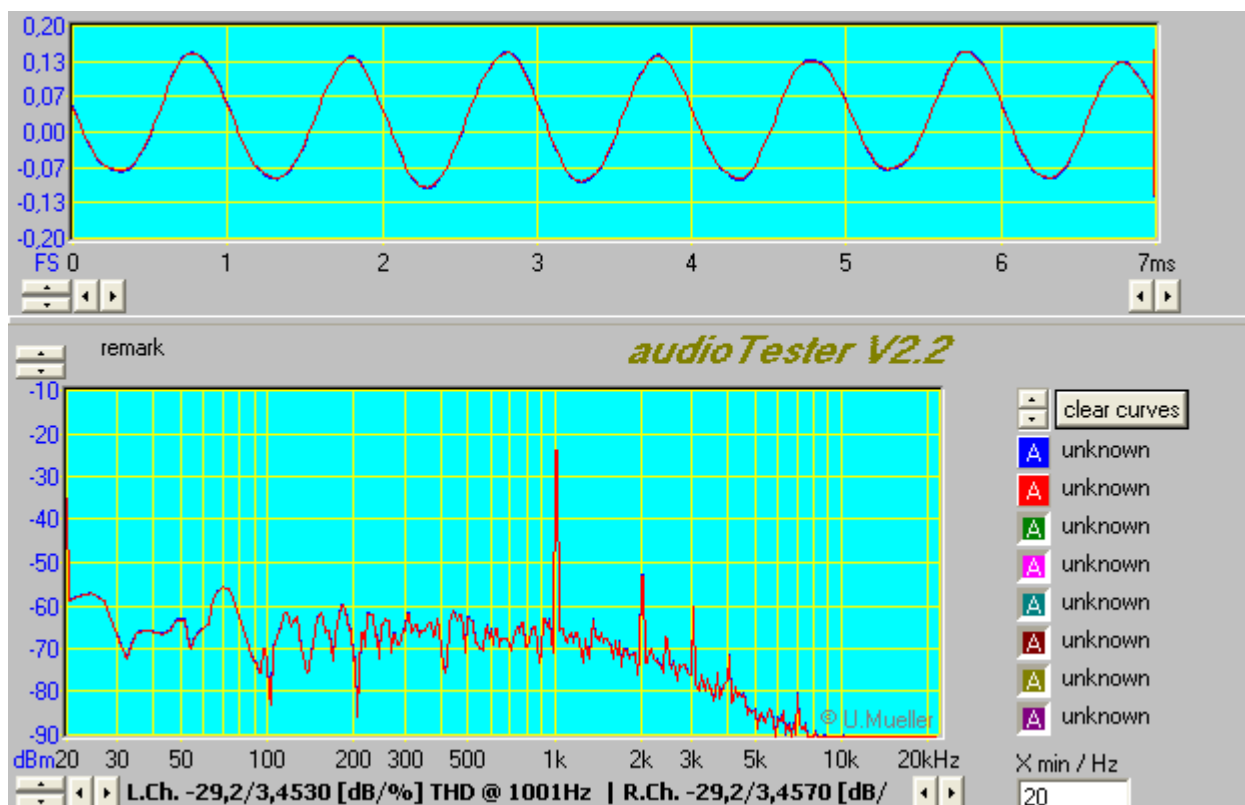
comprendre comment on teste la qualité d'un signal audio grâce au SINAD

1- A la sortie d'un étage audio, en l'absence de signal, Audiotester donne le résultat suivant :



Donner les caractéristiques spectrales de ce bruit.

2- On applique à l'entrée une sinusoïde à 1 kHz et paramètre Audiotester pour mesurer la distorsion harmonique (THD) :

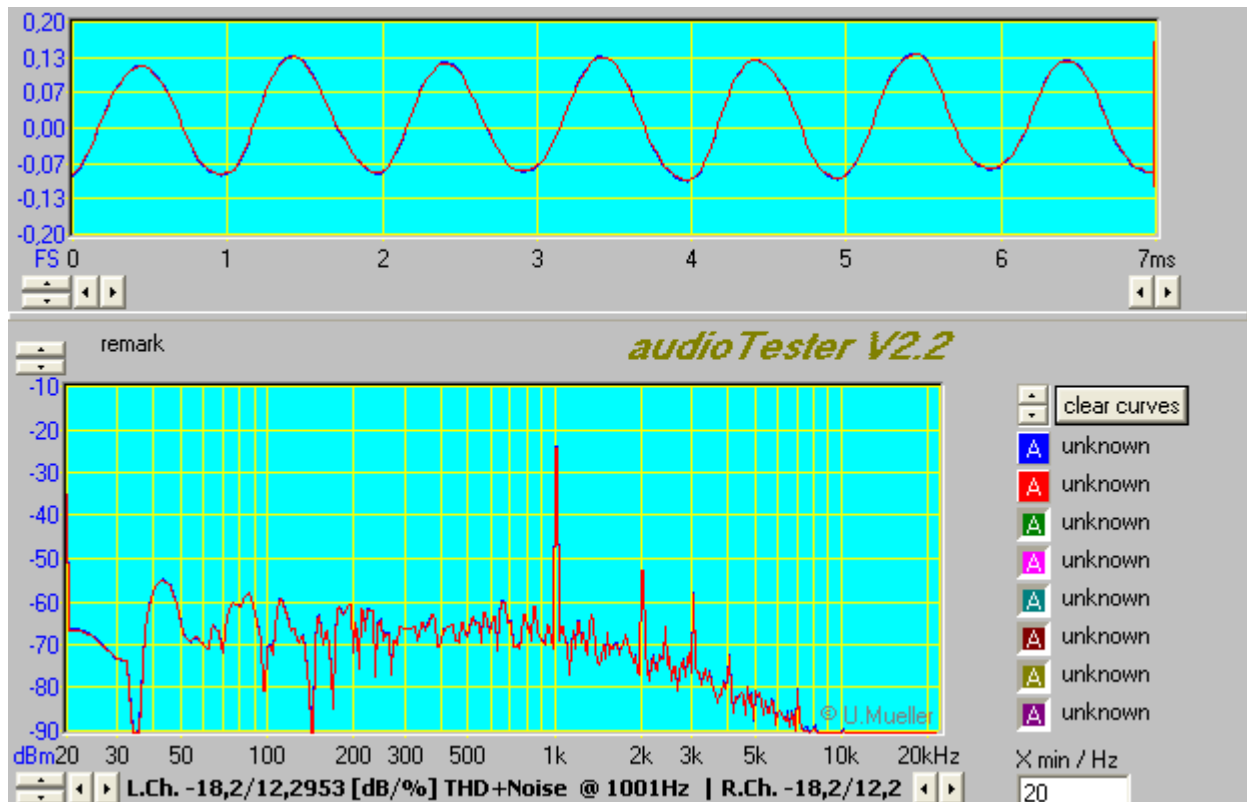


Quels défauts présente le signal à la sortie ?

Calculer son taux de distorsion harmonique $t_d = \frac{\sqrt{H_2^2 + H_3^2 + \dots}}{F}$ et comparer avec la valeur calculée par Audiotester.

3- On paramètre maintenant Audiotester pour qu'il tienne compte des harmoniques et du bruit :

Il affiche alors le taux de distorsion+bruit défini par : $THD + N = \frac{\sqrt{H_2^2 + H_3^2 + \dots + bruit^2}}{F}$ en % ou en dB



Lire le THD+Noise (voie de gauche) exprimé en % , puis l'exprimer en valeur normale, puis en dB et comparer avec la valeur en dB donnée par Audiotester.

On définit le **rapport Signal/Bruit** ou **Signal / Noise And Distorsion** : $SINAD = \frac{F}{\sqrt{H_2^2 + H_3^2 + \dots + bruit^2}} = \frac{1}{THD + N}$

Evaluer le SINAD du signal étudié, en valeur normale, puis en dB.

Comment lit-on facilement le SINAD avec Audiotester ?

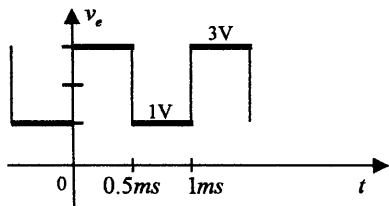
Le **SINAD** est une grandeur fondamentale en électronique, car elle traduit la bonne ou mauvaise qualité d'un signal.

Filtrage et spectre d'un signal



Comprendre que le filtrage d'un signal modifie la forme de son spectre

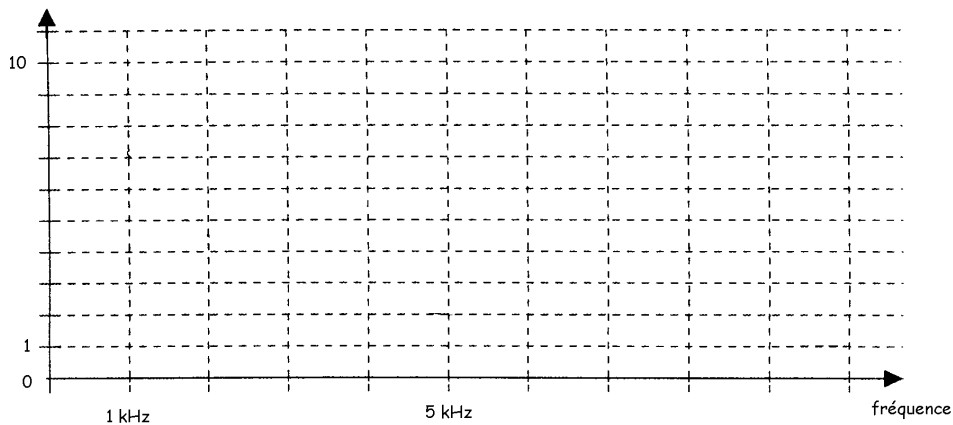
On s'intéresse au signal carré $v_e(t)$ ci-dessous :



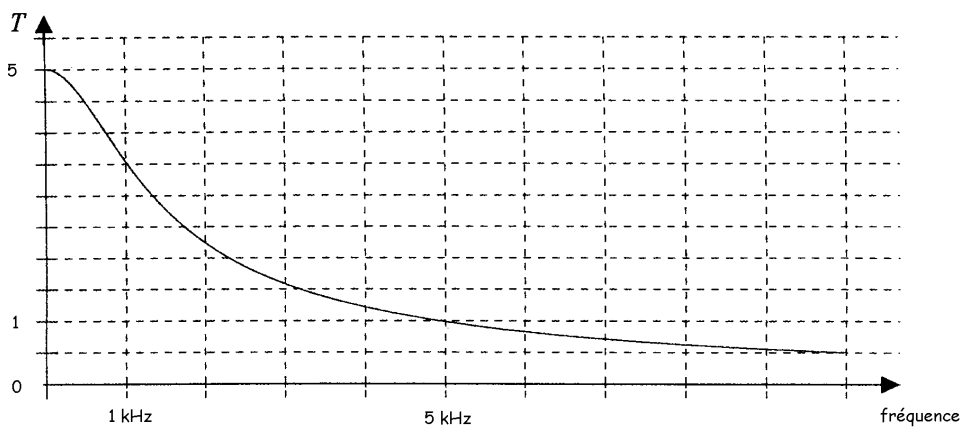
$$v_e = 2 + \frac{4}{\pi} \sin 2\pi f_e t + \frac{4}{3\pi} \sin 2\pi 3 f_e t + \frac{4}{5\pi} \sin 2\pi 5 f_e t + \dots$$

1) Compléter le tableau suivant avec les valeurs numériques et tracer le spectre du signal $v_e(t)$:

	comp. continue	fondamental	harmonique 3	harmonique 5
fréquence				
amplitude				



2) Le signal $v_e(t)$ est appliqué à l'entrée du filtre défini par sa transmittance et sa courbe de réponse suivantes :



$$T = \frac{-5}{1 + j \frac{f}{f_0}}$$

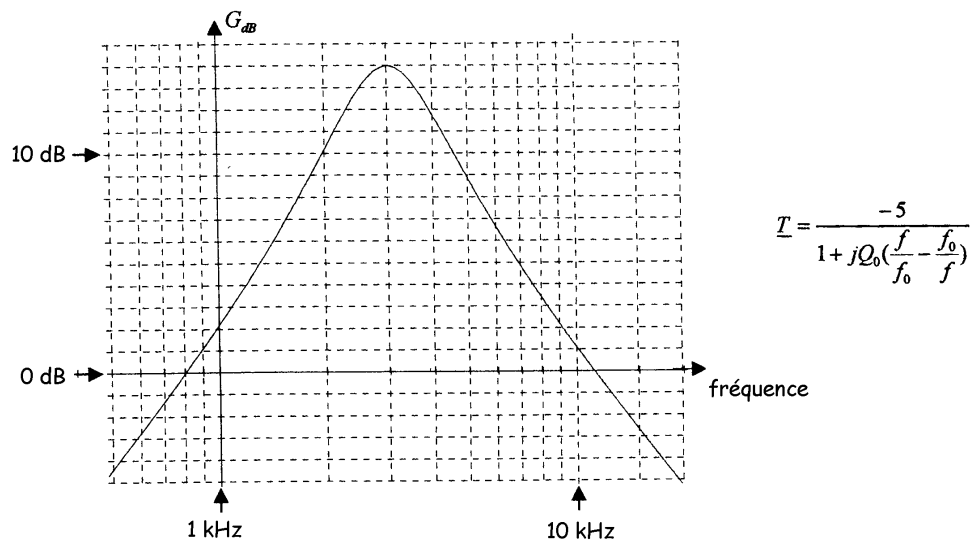
Déterminer graphiquement la transmittance maximale T_{max} du filtre et sa fréquence de coupure f_c .

3) Compléter le tableau suivant et tracer le spectre du signal $v_s(t)$ sur le graphe de la question 1) :

	comp. continue	fondamental	harmonique 3	harmonique 5
fréquence				
module de T				
amplitude en sortie				

4) Sur quel paramètre du filtre faudrait-il agir pour avoir une tension pratiquement continue en sortie du filtre ? Justifier votre réponse et proposer une valeur pour ce paramètre.

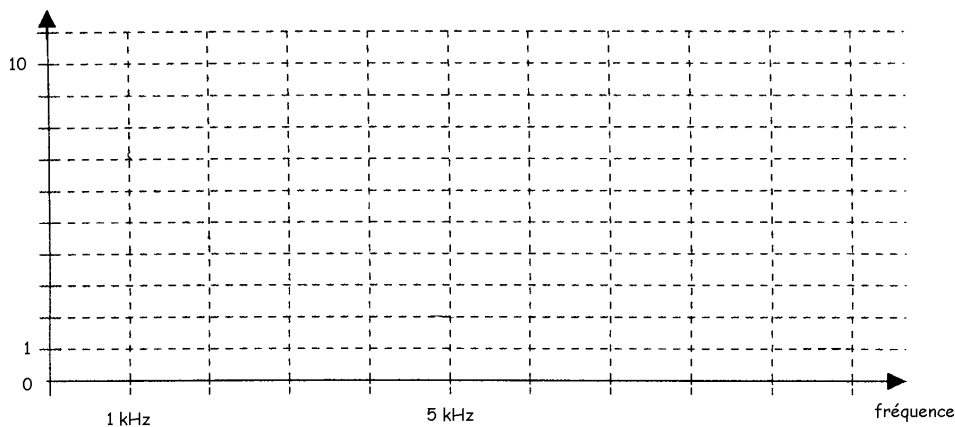
5) Le signal $v_e(t)$ est maintenant appliqué à l'entrée du filtre passe-bande dont la courbe de gain est donnée ci-dessous :



Déterminer graphiquement le gain maximal G_{max} du filtre, sa fréquence centrale f_0 et sa bande passante B.

6) Compléter le tableau suivant avec les valeurs numériques et tracer le spectre du signal $v_s(t)$:

	comp. continue	fondamental	harmonique 3	harmonique 5
fréquence				
gain du filtre				
module de T				
amplitude en sortie				



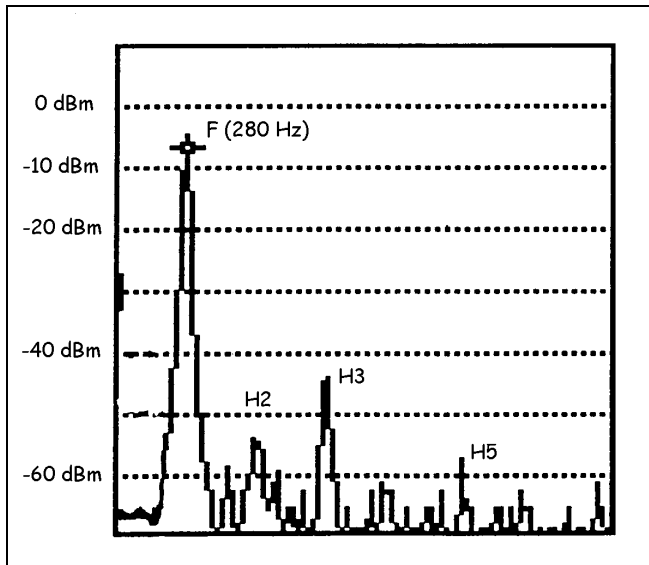
Le signal en sortie est-il parfaitement sinusoïdal ? Pourquoi ? Comment faudrait-il modifier le filtre pour avoir en sortie un signal pratiquement sinusoïdal ? Que vaut le coefficient de qualité Q_0 de ce filtre ? Proposer une valeur de coefficient de qualité Q_1 qui permettrait d'avoir un signal pratiquement sinusoïdal.

Amélioration de la pureté spectrale



comprendre comment on peut obtenir une sinusoïde quasi parfaite

L'analyse du spectre en sortie d'un oscillateur fournissant une tension sinusoïdale à la fréquence 280 Hz a donné le résultat suivant :



1) Calculer les valeurs efficaces du fondamental F et des 3 harmoniques les plus importants.

F = dBm = mV

H2 = dBm = mV

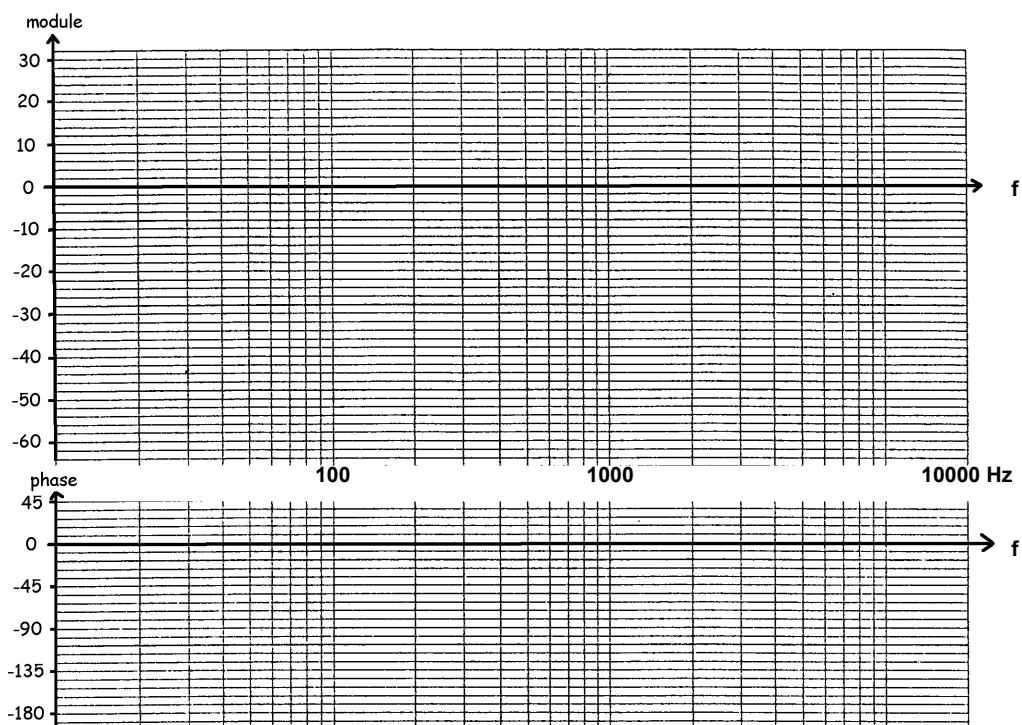
H3 = dBm = mV

H5 = dBm = mV

2) En déduire le taux de distorsion td du signal en sortie de l'oscillateur.

3) Pour améliorer la qualité du signal on fait suivre cet oscillateur par un filtre passe-bas du second ordre atténuant les fréquences au-delà de 280 Hz. Quel sera l'effet du filtre sur les harmoniques ? sur le taux de distorsion ? sur la forme du signal ?

4) Le filtre du second ordre utilisé a un gain de 0dB en continu, une cassure à 280 Hz et un gain de $-3dB$ à la cassure (réponse de Butterworth). Tracer le diagramme de Bode de ce filtre (diagramme asymptotique, puis courbe réelle).



5) Mesurer graphiquement le gain du filtre pour la fréquence du fondamental et des harmoniques 2, 3 et 5 et remplir la colonne correspondante du tableau .

	Amplitude en sortie de l'oscillateur (en dBm)	Gain du filtre (en dB)	Amplitude en sortie du filtre (en dBm)	Amplitude en sortie du filtre (en mV)
Fondamental F		-3dB		
Harmonique 2				
Harmonique 3				
Harmonique 5				

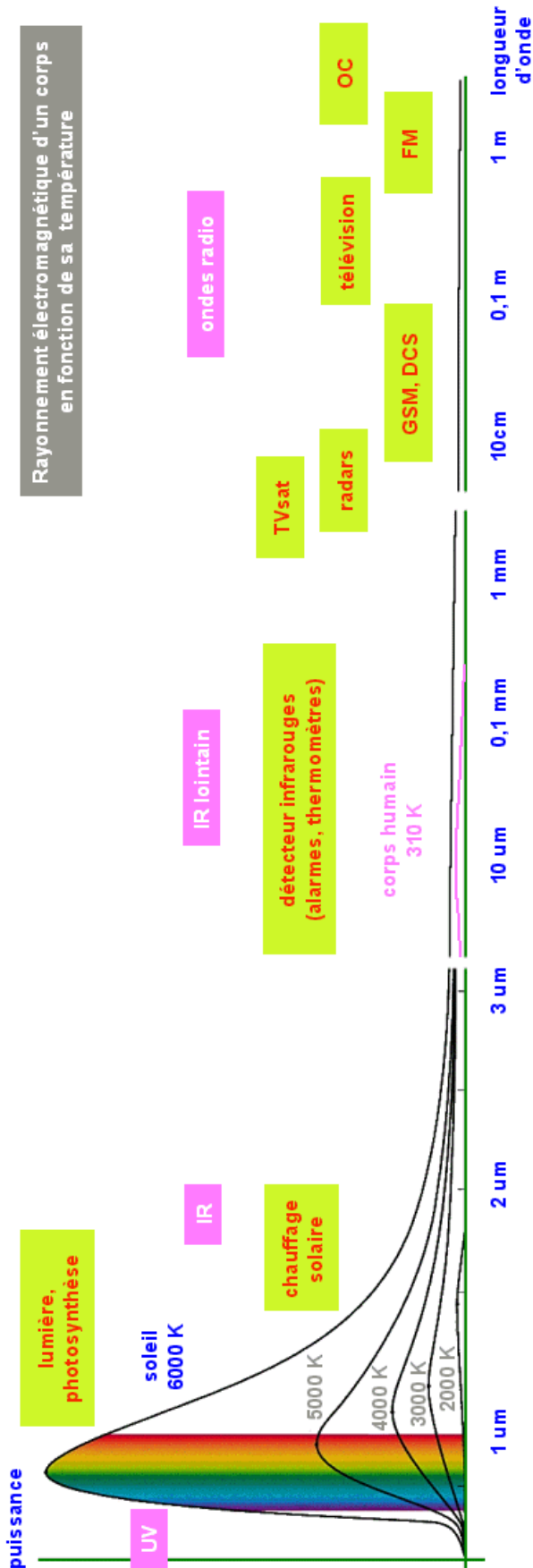
6) En déduire les amplitudes du fondamental et des harmoniques en sortie du filtre en dBm, puis en mV. Remplir la colonne correspondante du tableau.

7) Déterminer le nouveau taux de distorsion **td'** en sortie du filtre et conclure sur l'utilité du filtre. Comment pourrait-on encore améliorer la pureté spectrale du signal ?

Sources de rayonnement électromagnétique naturelles



Comprendre le rayonnement électromagnétique émis par les corps



1- La température de surface du soleil est d'environ 6000K. Il rayonne de l'énergie sous forme d'onde EM. Le maximum se trouvant à peu près au milieu de la bande visible (de 0,4 à 0,8 μm), calculer la fréquence correspondant à ce maximum d'émission.

2- Le corps humain est à 310K et émet un maximum d'énergie EM à $\lambda \approx 11 \mu\text{m}$. A quelle fréquence se trouve ce maximum ?

Citez quelques applications de ce phénomène.

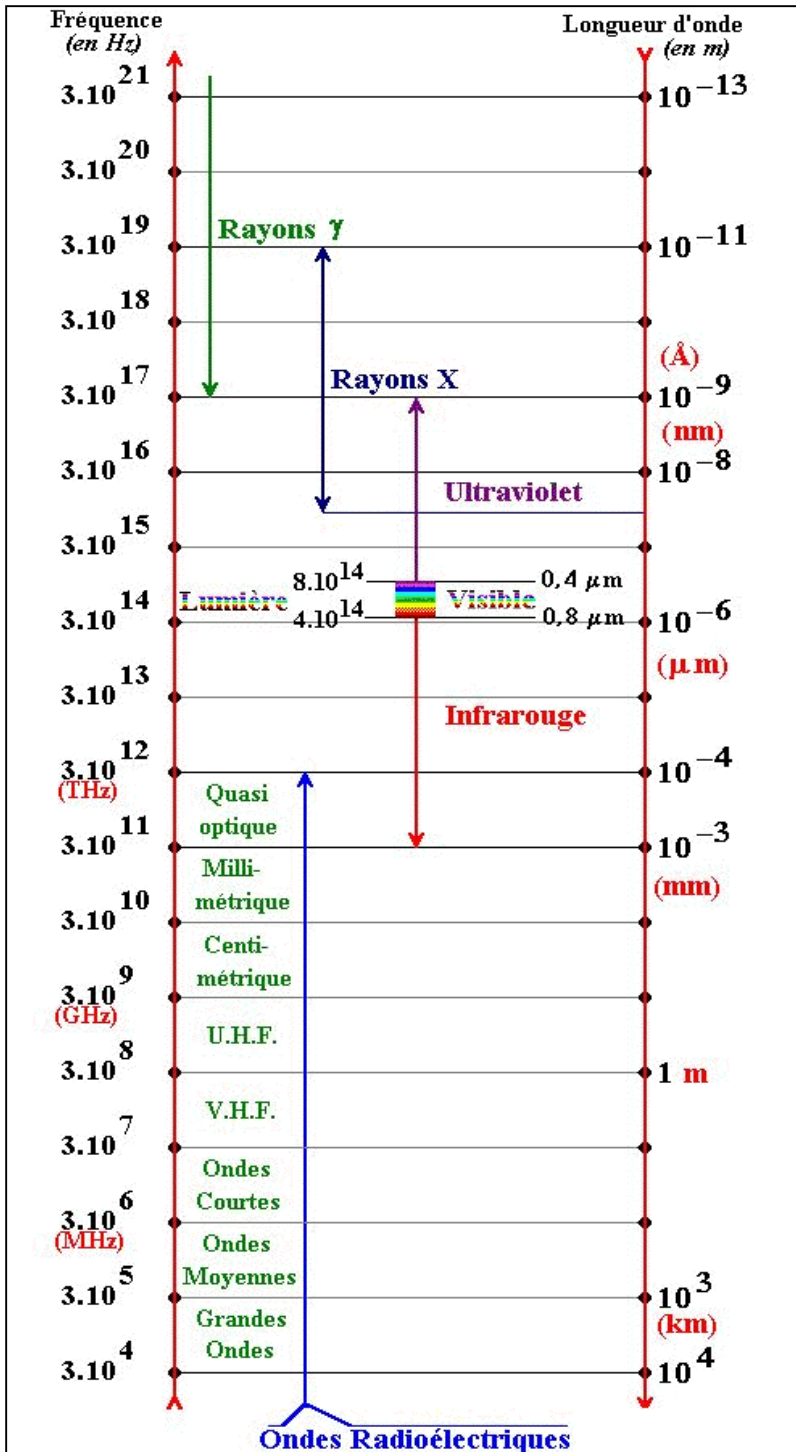
Spectre électromagnétique



reconnaitre les différentes sortes d'ondes électromagnétiques

Une onde électromagnétique peut être caractérisée soit par sa fréquence f , soit par sa longueur d'onde λ :

- la longueur d'onde λ est le trajet parcouru par l'onde durant une période T : $\lambda = \frac{c}{f} = cT$
- la longueur d'onde λ s'exprime en mètres
- la grandeur c est la vitesse de propagation (ou célérité) de l'onde EM dans le vide ou l'air : $c \approx 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$



1- Quelle est la longueur d'onde λ_0 correspondant à une station au milieu de la bande FM (88-108 MHz)? Quelle est l'ordre de grandeur de la longueur D d'une antenne d'un poste récepteur FM ?

2- La bande UHF de télévision analogique terrestre va de 470 à 870 MHz environ. Quelle est la longueur d'onde λ_1 correspondant à une station au milieu de la bande ? Comparer λ_1 à la longueur du brin actif d'une l'antenne Yagi.

3- Un téléphone GSM traite des signaux de l'ordre de 900 MHz ou 1800 MHz. Quelles sont les longueurs d'onde λ_2 et λ_3 correspondant à ces fréquences ?

4- Un système de réception TV-sat traite des signaux dont la fréquence est de l'ordre de 10 GHz. Quelle est la longueur d'onde λ_4 de ces signaux ?

Spectres de porteuses sinusoïdales modulées

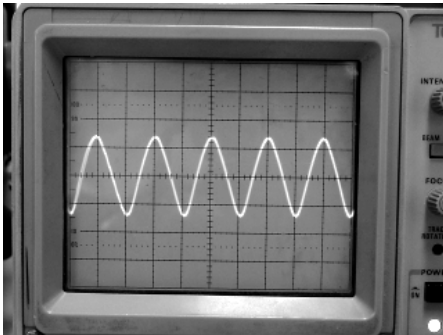


Se familiariser avec les caractéristiques spectrales des signaux RF modulés

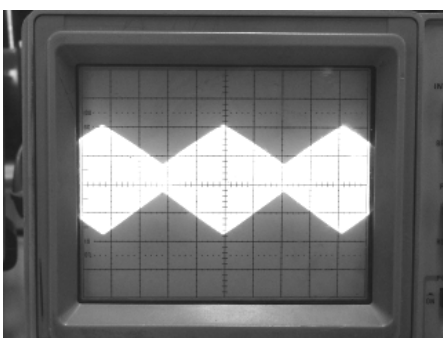
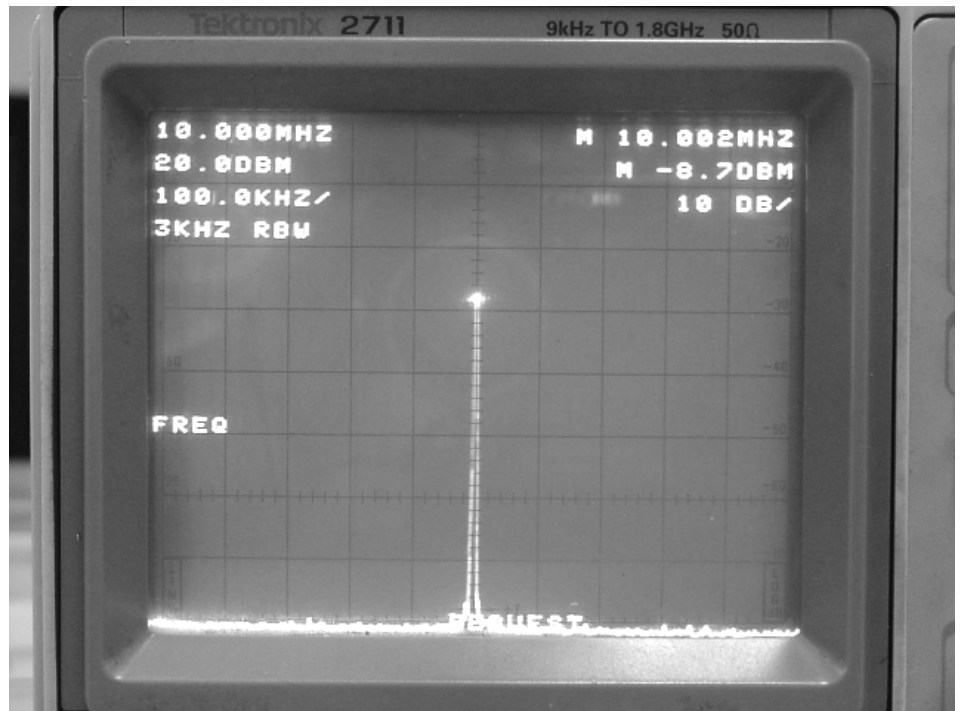
Les copies d'écran suivantes représentent l'oscillogramme et le spectre de signaux sinusoïdaux pur ou modulés.

Dans les 3 cas, déterminer :

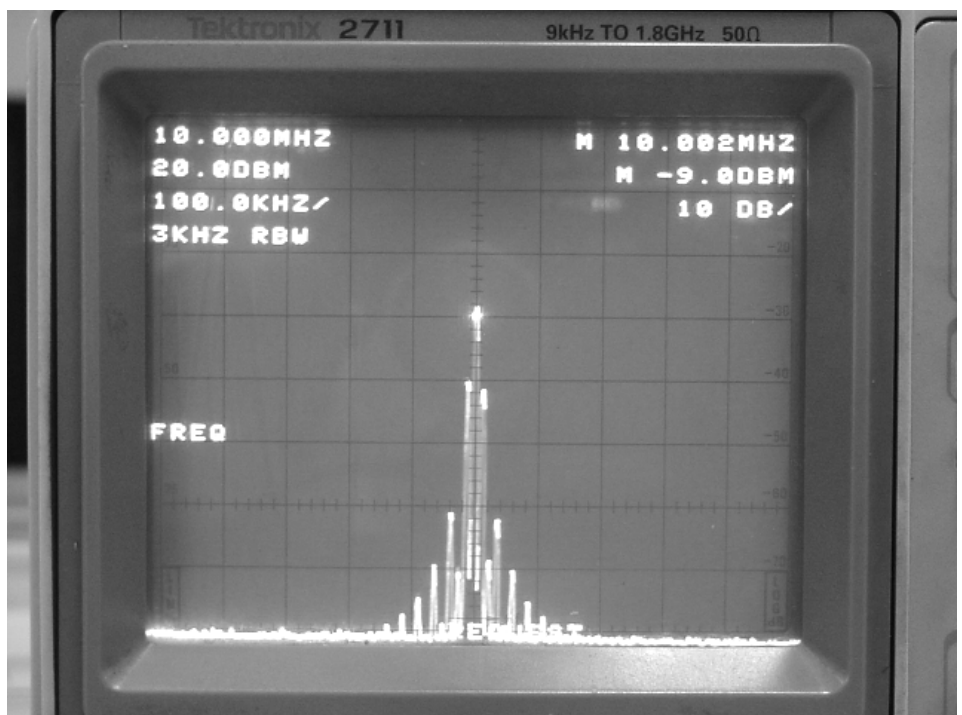
- l'amplitude et la fréquence de la porteuse
- le type de modulation éventuelle (amplitude ou fréquence)
- l'encombrement spectral du signal modulé à -20dB et -40dB du maximum

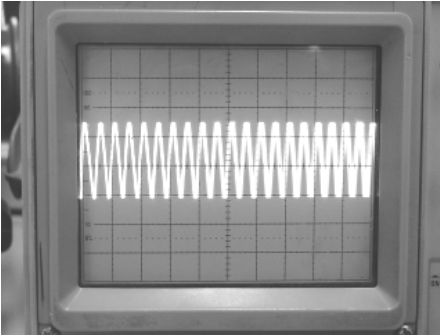


modulation : aucune - AM - FM
 fréquence :
 niveau :

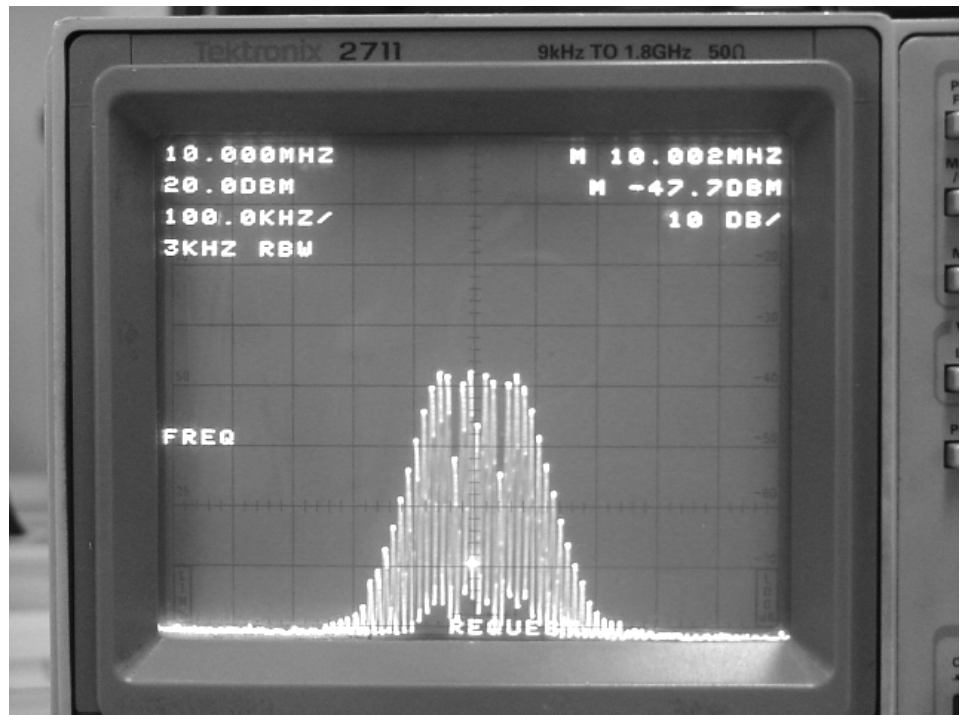


modulation : aucune - AM - FM
 fréquence :
 bande occupée à -20 dB : kHz
 bande occupée à -40 dB : kHz





modulation : aucune - AM - FM
 fréquence :
 bande occupée à -20 dB : kHz
 bande occupée à -40 dB : kHz



Que peut-on dire de la forme du spectre par rapport à la fréquence centrale pour un signal modulé ?

Spectre d'un émetteur de la bande FM

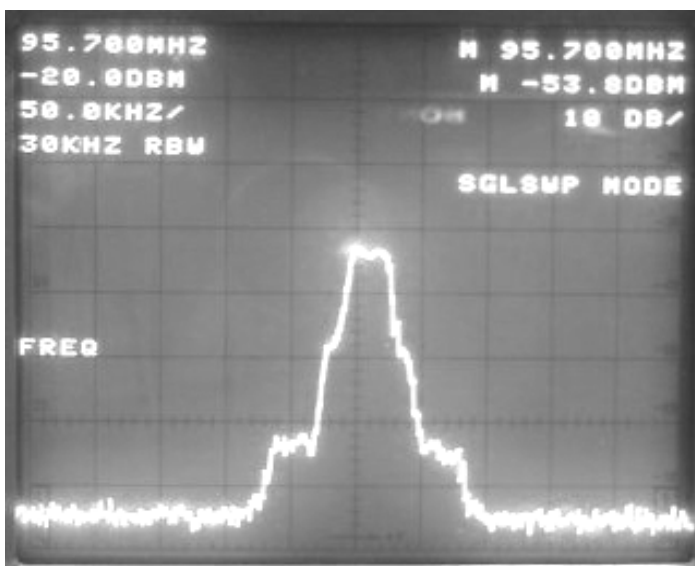


Se familiariser avec les caractéristiques spectrales des signaux modulés

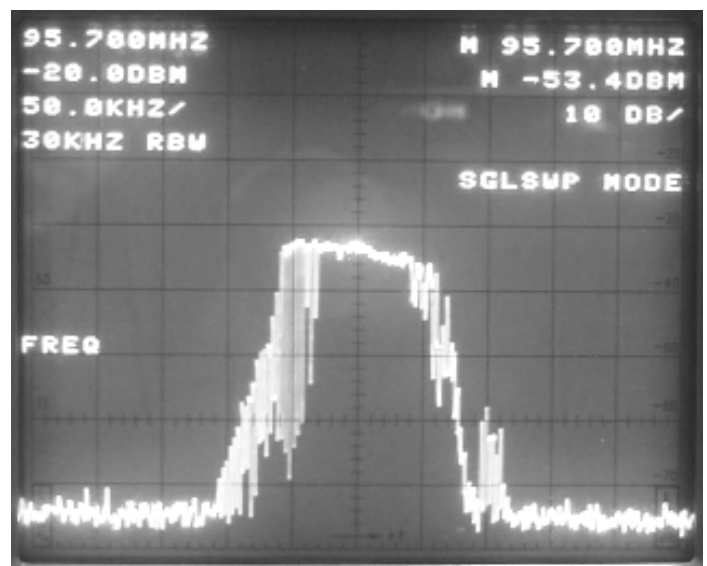
1) Sur l'enregistrement du spectre de la bande FM (de 88 à 108 MHz en Europe), identifier quelques émetteurs.



2) La bande occupée par un émetteur varie en fonction du signal émis. Pour les 2 enregistrements ci-dessous correspondant à un même émetteur à des instants différents, mesurer la bande occupée à -20 dB.



Bande occupée : kHz



Bande occupée : kHz

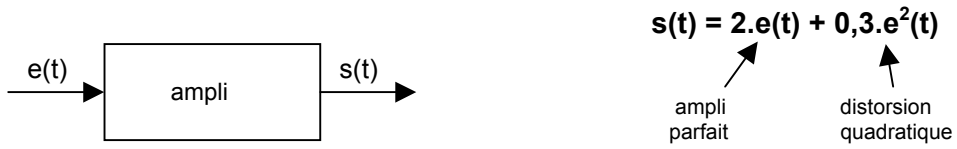
3) La largeur attribuée à un émetteur est d'environ 250 kHz. Quel est le nombre maximal d'émetteurs susceptibles d'émettre dans la bande FM ?

Caractéristique et distorsions



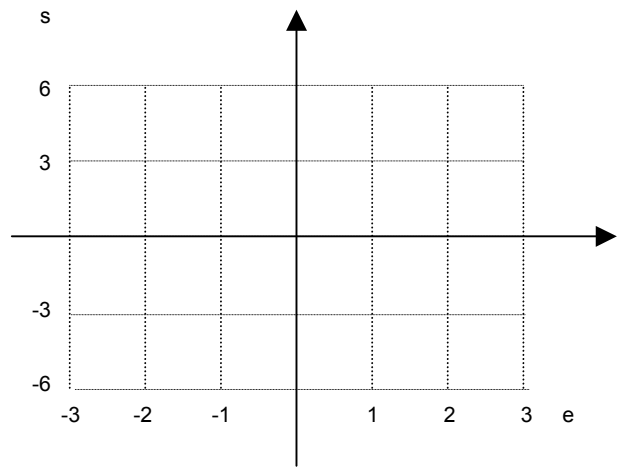
comprendre l'origine des distorsions qui peuvent affecter un équipement (ampli Hi-fi, enceintes...)

Un amplificateur présente un défaut appelé « distorsion quadratique » qui se traduit par la relation entrée-sortie suivante :



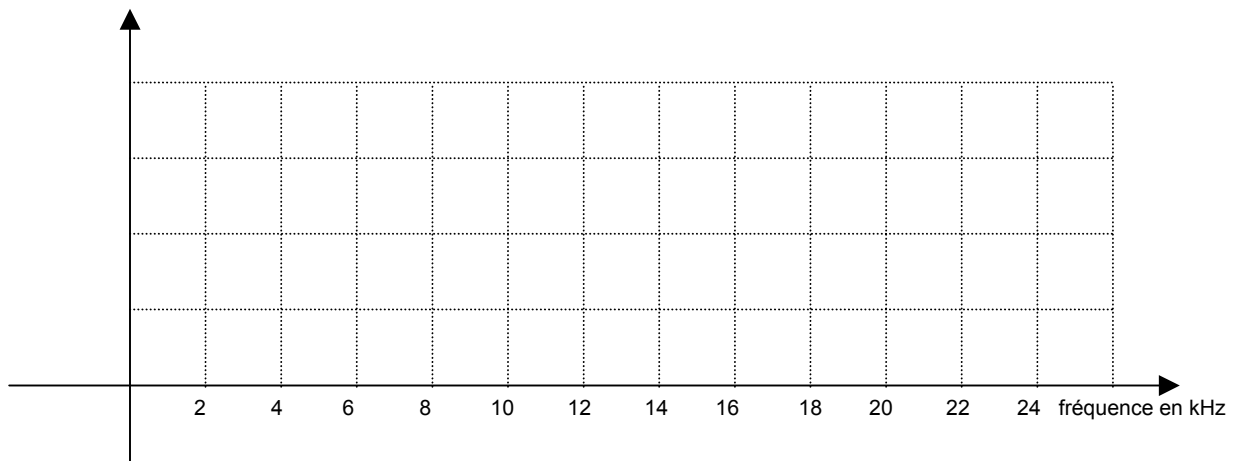
1) Remplir le tableau donnant les valeurs de S pour quelques valeurs de E et tracer la caractéristique S=f(E) de cet ampli. Cette caractéristique est-elle linéaire ? cet ampli déforme-t-il le signal ? Tracer la caractéristique de l'ampli parfait.

E	-3	-2	-1	0	1	2	3
S				0			



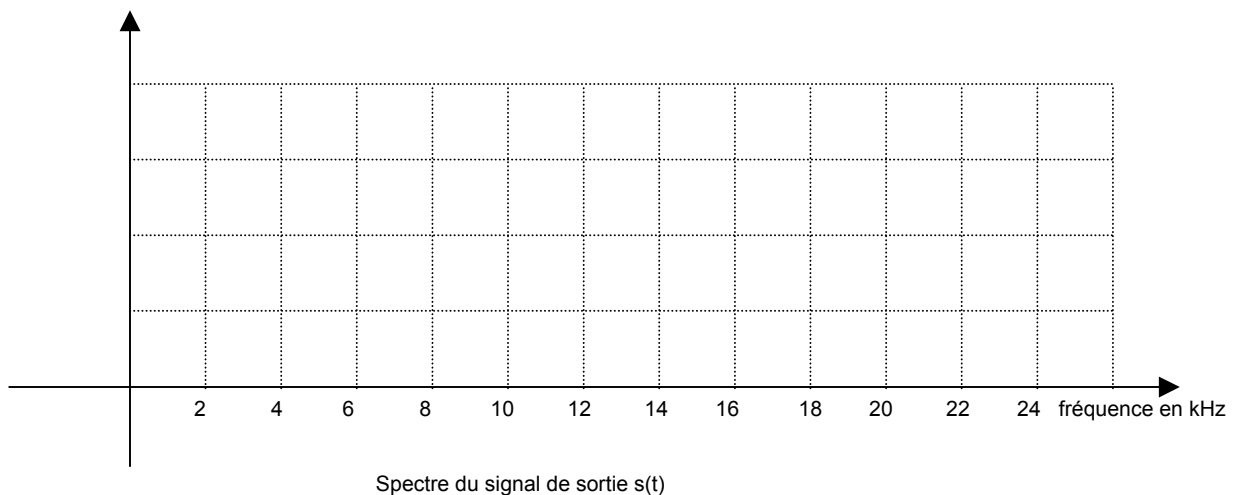
2) On applique à l'entrée de l'ampli un signal : $e(t) = 2\cos(\omega_1 t)$ avec $f_1 = 10$ kHz. Etablir l'expression du signal de sortie s(t), tracer son spectre et conclure.

On rappelle que : $\cos^2(a) = 0,5 + 0,5\cos(2a)$ et $\cos(a).\cos(b) = 0,5\cos(a+b) + 0,5.\cos(a-b)$



Spectre du signal de sortie s(t)

3) On applique maintenant à l'entrée une somme de 2 signaux sinusoïdaux : $e(t) = 2\cos(\omega_1 t) + 2\cos(\omega_2 t)$ avec $f_1 = 10$ kHz et $f_2 = 11$ kHz. Etablir l'expression de $s(t)$ et tracer son spectre.



4) Conclusion :

Une caractéristique de transfert non linéaire produit :

- si on applique un signal sinusoïdal, de la distorsion
- si on applique deux signaux sinusoïdaux, de la distorsion

Remarques : en pratique, pour un ampli ou pour des haut-parleurs de bonne qualité, le terme de distorsion quadratique est bien plus faible que celui donné dans cet exercice.

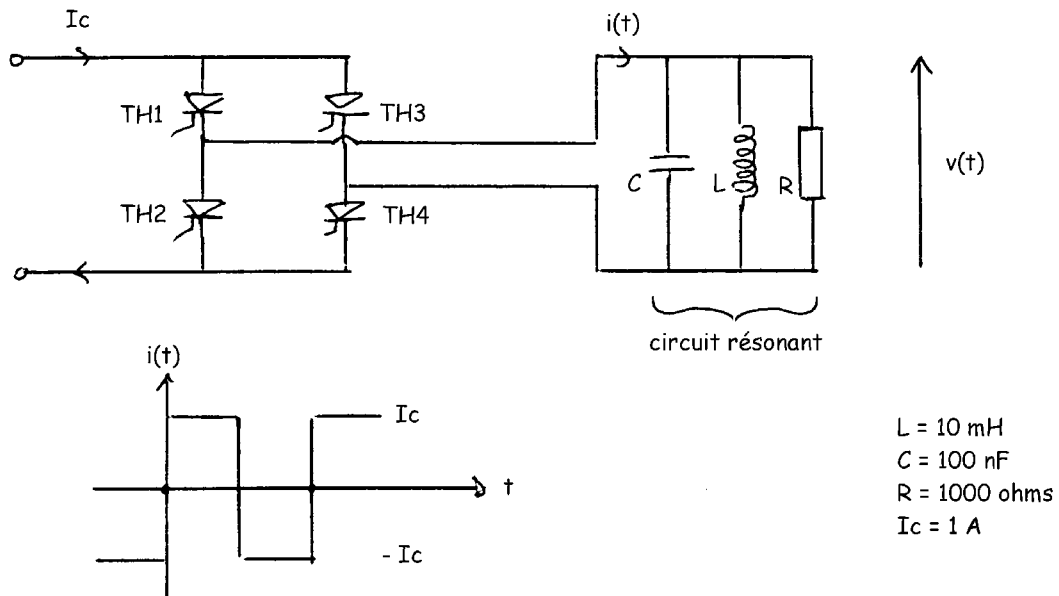
Tension et courant dans un onduleur



étudier la forme de la tension produite par un onduleur grâce à la décomposition en série de Fourier

Un onduleur est un dispositif qui produit une tension alternative à partir d'une source continue. L'onduleur pour four à induction ci-dessous est alimenté par un courant I_c qu'on supposera parfaitement constant.

Cet onduleur est chargé par un circuit résonant R,L,C et lui fournit un courant $i(t)$ en créneaux d'amplitude I_c dont la fréquence f_0 est égale à la fréquence de résonance de la charge.



On donne la décomposition en série de Fourier du courant $i(t)$:

$$i(t) = \frac{4I_c}{\pi} \left[\sin(\omega_0 t) + \frac{\sin(3\omega_0 t)}{3} + \frac{\sin(5\omega_0 t)}{5} + \dots \right]$$

1) Calculer la valeur de f_0 et préciser, sur le graphe de $i(t)$, dans quel ordre on commande les thyristors TH1, TH2, TH3 et TH4.

2) A partir de la décomposition en série de Fourier de $i(t)$, calculer les valeurs du fondamental I_1 et des harmoniques I_3 et I_5 du courant dans la charge.

	I_1	I_3	I_5
expression			
fréquence			
amplitude			

Remarque : dans la suite de l'exercice, on va successivement étudier le comportement du circuit aux 3 fréquences.

3) Donner l'expression littérale de l'impédance complexe $\underline{Z}(j\omega)$ du circuit résonant, puis de son module Z .

4) Calculer l'impédance de ce circuit résonant aux fréquences f_0 , $3f_0$ et $5f_0$.

	à f_0	à $3f_0$	à $5f_0$
expression littérale	$Z_1 =$	$Z_3 =$	$Z_5 =$
valeur	$Z_1 =$	$Z_3 =$	$Z_5 =$

5) En déduire la valeur du fondamental V_1 et des harmoniques 3 et 5 de la tension $v(t)$ aux bornes de la charge.

	à f_0	à $3f_0$	à $5f_0$
courant $i(t)$	$I_1 =$	$I_3 =$	$I_5 =$
impédance	$Z_1 =$	$Z_3 =$	$Z_5 =$
tension $v(t)$	$V_1 =$	$V_3 =$	$V_5 =$

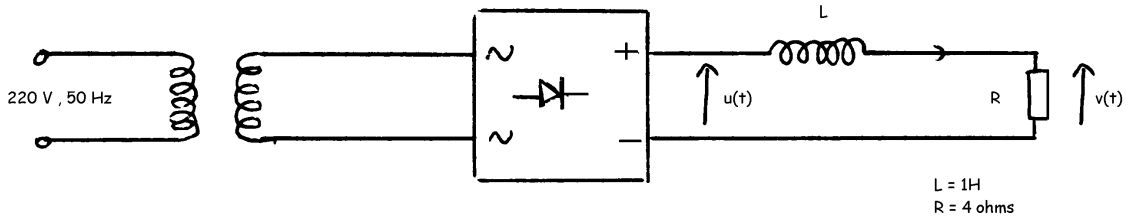
Que peut-on dire de l'allure temporelle de la tension $v(t)$ aux bornes de la charge résonante ?

Efficacité d'une bobine de lissage

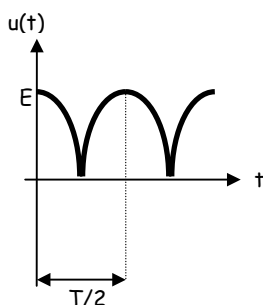


étudier l'efficacité d'une inductance de lissage grâce à la décomposition en série de Fourier

Un montage comportant un transformateur abaisseur, un pont redresseur double alternance et une inductance de filtrage alimente une charge R.



La tension en sortie du pont est une tension redressée double alternance d'amplitude 20V crête.



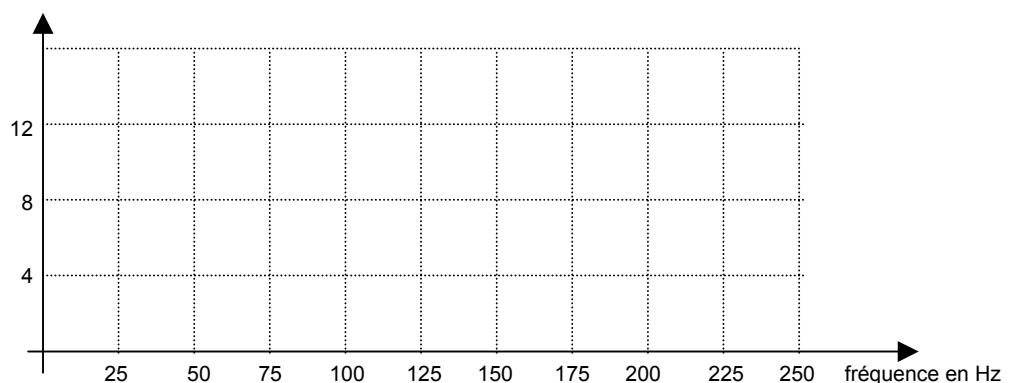
$$u(t) = \frac{2E}{\pi} \left[1 + \frac{2 \cos(2\omega t)}{3} - \frac{2 \cos(4\omega t)}{15} + \dots \right]$$

1) En utilisant la décomposition en série de Fourier de $u(t)$, calculer la valeur moyenne U_0 de la tension $u(t)$, ainsi que les amplitudes U_2 et U_4 des harmoniques 2 et 4.

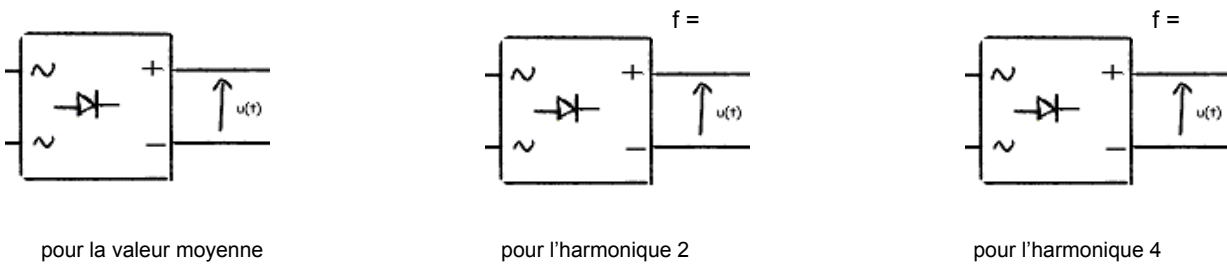
composante	valeur moyenne	harmonique 2	harmonique 4
expression			
fréquence			
amplitude			

Pourquoi n'y a-t-il pas de fondamental dans le signal $u(t)$?

2) Tracer le spectre de la tension $u(t)$ en se limitant aux 3 premières raies.

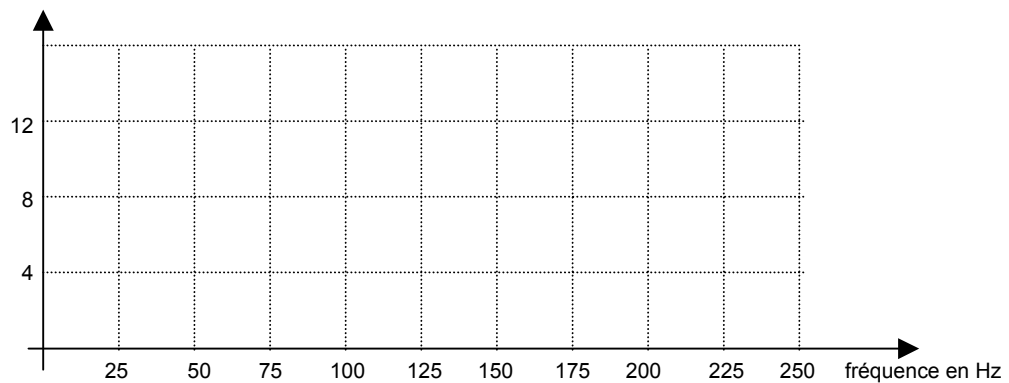


3) Dessiner les schémas équivalents du montage en sortie du pont redresseur pour la valeur moyenne de $u(t)$ et pour les deux harmoniques H_2 et H_4 .



3) Calculer les impédances Z_0 , Z_2 et Z_4 du circuit en sortie du pont aux fréquences correspondant à ces 3 raies, puis les valeurs de la valeur moyenne I_0 et des deux harmoniques I_2 et I_4 du courant dans la charge.

4) En déduire les composantes spectrales V_0 , V_2 et V_4 de la tension $v(t)$ aux bornes de la charge et tracer son spectre.



5) Esquisser son allure temporelle et donner une estimation de la valeur crête à crête de son ondulation Δv .



Remarque : ce dispositif de filtrage est très utilisé dans les applications à courants forts où le filtrage par condensateur nécessiterait des valeurs de capacités beaucoup trop élevées.

► Spectre d'un signal périodique

1)

	Xo	F	H2	H3	H4	H5
fréquence	0	2 kHz	4 kHz	6 kHz	8 kHz	10 kHz
amplitude	0	9,54 V	4,77 V	3,18 V	2,39 V	1,91 V

2) le spectre entre 0 et 10 kHz est formé de 5 raies

► Spectre d'un signal impulsionnel

2) l'harmonique 32 a une fréquence de 36 MHz, le fondamental est donc à $f_0 = 36/32 = 1,125$ MHz

3) l'harmonique n a une amplitude : $H_n = 2aE \frac{\sin(n\pi a)}{n\pi a}$

4) l'harmonique 8 est le premier harmonique nul, donc $\sin(8\pi a) = 0$ soit $8\pi a = \pi$ et donc $a = 1/8 = 0,125$

5) la largeur des impulsions vaut $aT = 0,111 \mu s$, et son inverse $1/aT = 9$ MHz donne la fréquence de l'harmonique nul

6) **Règle pratique** pour le tracé du spectre d'un train d'impulsions de largeur τ :

- on dessine en pointillés l'enveloppe : courbe en $\sin(X)/X$ passant par 0 à $1/\tau, 1/2\tau, 1/3\tau \dots$
- on place à l'intérieur les raies à $f_0, 2 f_0, 3 f_0 \dots$

► Utilisation des dBm

1) $P = V^2/R$ V est la valeur efficace de la tension sinusoïdale, P ne dépend pas de la fréquence

$$2) V_{dBm} = 10 \cdot \log \left[\frac{V^2}{10^{-3}} \right] = 10 \cdot \log(V^2) - 10 \cdot \log(0,05) = 20 \cdot \log V + 13$$

Remarque : on passe des dBm aux volts par : $V = 10^{\frac{V_{dBm} - 13}{20}}$

3) \Rightarrow pour $V = 100V$ $P = 200 W = 53 dBm$ \Rightarrow pour $V = 1\mu V$ $P = 2 \cdot 10^{-14} W = -107 dBm$

L'utilisation des dBm permet d'éviter l'écriture de nombres avec des puissances de 10. Dans la quasi-totalité des situations le niveau en dBm s'exprime avec un nombre à 2 ou au maximum 3 chiffres.

$$4) S_{dBm} = 20 \cdot \log S + 13 = 20 \cdot \log(A_v \cdot E) + 13 = 20 \cdot \log A_v + 20 \cdot \log(E) + 13 = G_{dB} + E_{dBm}$$

Le niveau de sortie en dBm d'un étage s'obtient en ajoutant au niveau d'entrée en dBm le gain de l'étage en dB.

$$5) S_{dBm} = -78 dBm + 12 dB - 3 dB + 27 dB - 2 dB + 15 dB = -29 dBm$$

► Taux de distorsion

1) On lit les amplitudes des raies en dBm et on les convertit en volts :

F ; H₂ ; H₃ : 280 ; 0,56 ; 0,25 ; 0,45 ; 0,63 ; 0,25 ; 0,5 ; 0,2 ; 0,25 ; 0,11 mV

2) $td = 0,0042 = 0,42 \%$

► SINAD et qualité

1) le bruit est blanc jusqu'à 1 kHz environ (spectre plat) puis il décroît

2) le signal présente de la distorsion car il contient des harmoniques.

$$F = -23 \text{ dBm} = 16 \text{ mV} \quad H_2 = -52 \text{ dBm} = 0,57 \text{ mV} \quad H_3 = -60 \text{ dBm} = 0,22 \text{ mV} \quad H_5 = -70 \text{ dBm} = 0,07 \text{ mV}$$

distorsion : $td \approx 0,038 \approx 3,8 \%$ alors que Audiotester mesure 3,4 %

$$3) \text{THD+N} \approx 12,3 \% \approx 0,123 \approx -18,2 \text{ dB} \quad \text{SINAD} = 1/(\text{THD+N}) = 1/0,123 = 8,13 = 18,2 \text{ dB}$$

Règle : pour lire le SINAD, il suffit de lire le THD+N en dB et d'enlever le signe -.

► Filtrage et spectre

1)

	comp. continue	fondamental	harmonique 3	harmonique 5
fréquence	0	1 kHz	3 kHz	5 kHz
amplitude	2 V	1,27 V	0,42 V	0,25 V

$$2) T_{\max} = 5 \text{ (lue à } f=0) \quad f_c = 1 \text{ kHz (lue à } T_{\max}/1,414)$$

3) On lit graphiquement le module de la transmittance à la fréquence des différentes composantes et on calcule l'amplitude de la raie en sortie en multipliant l'amplitude à l'entrée par le module de la transmittance, ce qui donne :

	comp. continue	fondamental	harmonique 3	harmonique 5
fréquence	0	1 kHz	3 kHz	5 kHz
module de T	5	3,5	1,6	1
amplitude en sortie	10 V	4,5 V	0,63 V	0,25 V

4) Pour ne garder que la composante continue, il faudrait avoir une fréquence de coupure très inférieure à 1 kHz, par exemple $f_c = 10 \text{ Hz}$.

$$5) G_{\max} = 14 \text{ dB} \quad f_0 = 3 \text{ kHz} \quad B = 2 \text{ kHz (lue à } 14 - 3 = 11 \text{ dB)}$$

6) Ce filtre passe-bande a visiblement une transmittance nulle en continue et favorise l'harmonique 3, ce qui donne :

	comp. continue	fondamental	harmonique 3	harmonique 5
fréquence	0	1 kHz	3 kHz	5 kHz
gain du filtre	$-\infty$	2 dB	14 dB	9 dB
module de T	0	1,26	5	2,8
amplitude en sortie	0	1,6 V	2,1 V	0,7 V

Le signal de sortie n'est pas sinusoïdal puisqu'il est formé de 3 composantes à 1, 3 et 5 kHz.

$$6) Q_0 = f_0/B = 1,5 \quad \text{pour avoir un signal presque sinusoïdal, il faudrait un filtre plus sélectif, par ex. } Q_0 > 50 - 100$$

► Amélioration de la pureté spectrale

$$1) F = 110 \text{ mV} \quad H_2 = 0,45 \text{ mV} \quad H_3 = 1,4 \text{ mV} \quad H_5 = 0,35 \text{ mV}$$

$$2) td \approx 1,4 \%$$

3) le filtre atténue les harmoniques, il améliore donc le taux de distorsion et le signal est plus proche d'une sinusoïde

4) Filtre du second ordre \Rightarrow pente de -40 dB après la cassure

5) et 6) On lit graphiquement l'atténuation du filtre aux fréquences du fondamental et des harmoniques :

	Amplitude en sortie de l'oscillateur (en dBm)	Gain du filtre (en dB)	Amplitude en sortie du filtre (en dBm)	Amplitude en sortie du filtre (en mV)
Fondamental F	- 6 dBm	-3dB	- 9 dBm	79 mV
Harmonique 2	- 55 dBm	- 12 dB	- 67 dBm	0,1 mV
Harmonique 3	- 44 dBm	- 19 dB	- 65 dBm	0,13 mV
Harmonique 5	- 57 dBm	- 28 dB	- 85 dBm	0,013 mV

7) le nouveau taux de distorsion vaut $t'd \approx 0,2 \%$. Pour l'améliorer encore, il faudrait un filtre de pente plus raide après la coupure.

► Sources naturelles de rayonnement

1) le milieu du spectre visible se trouve à $\lambda = 0,6 \mu\text{m}$ soit à une fréquence $f = 5 \cdot 10^{14}$ Hz

2) le corps humain émet un maximum d'énergie à $\lambda = 11 \mu\text{m}$ soit à une fréquence $f = 2,7 \cdot 10^{13}$ Hz

Applications : détection d'intrus avec des capteurs pyroélectriques munis de fenêtres ne laissant passer que les radiations autour de $11 \mu\text{m}$, lunettes de vision nocturne transformant les radiations IR des êtres vivants en lumière visible.

► Spectre électromagnétique

1) le milieu de la bande FM est 98 MHz, soit une longueur d'onde de $\lambda_0 \approx 3\text{m}$ (antenne FM télescopique $0,75 \text{ cm} \approx \lambda/4$)

2) le milieu de la bande UHF est 670 MHz, soit une longueur d'onde de $\lambda_1 \approx 0,45 \text{ m}$ (antenne Yagi $23 \text{ cm} \approx \lambda/2$)

3) pour la bande 900 MHz, $\lambda_2 \approx 33 \text{ cm}$ pour la bande 1800 MHz, $\lambda_3 \approx 16 \text{ cm}$ (antenne : qqes cm)

4) en TV satellite à 10 GHz, $\lambda_4 \approx 3 \text{ cm}$ antenne (1 à 2 cm)

Conclusion : la taille de l'antenne est toujours liée à la longueur d'onde (entre $\lambda/4$ et $\lambda/2$)

► Spectre de porteuses modulées

- pas de modulation : $f = 10 \text{ MHz}$, niveau $-8,7 \text{ dBm}$

- modulation AM : $f = 10 \text{ MHz}$, bande $B_{-20\text{dB}} \approx 20 \text{ kHz}$, bande $B_{-40\text{dB}} \approx 20 \text{ kHz}$

- modulation FM : $f = 10 \text{ MHz}$, bande $B_{-20\text{dB}} \approx 200 \text{ kHz}$, bande $B_{-40\text{dB}} \approx 300 \text{ kHz}$

Le spectre d'un signal modulé est toujours symétrique par rapport à la porteuse.

► Spectre d'un émetteur FM

1) le marqueur est sur $95,68 \text{ MHz} \approx 95,7 \text{ MHz}$ il s'agit donc de France-Inter

2) la bande occupée se mesure en descendant de 20 dB (2 carreaux) par rapport au maximum du spectre.

Instant 1 : $B \approx 70 \text{ kHz}$

Instant 2 : $B \approx 150 \text{ kHz}$

Le nombre de canaux disponibles dans la bande FM est de : $n = 20 \text{ MHz}/0,25 \text{ MHz} = 80$

► Caractéristique et distorsions

1) La caractéristique de transfert n'est pas linéaire, l'ampli déforme le signal, il présente donc de la distorsion

E	-3	-2	-1	0	1	2	3
S	-3,3	-2,8	-1,7	0	2,3	5,2	8,7

$$2) s(t) = 2.[2\cos(\omega_1 t)] + 0,3.[2\cos(\omega_1 t)]^2 = 0,6 + 4.\cos(\omega_1 t) + 0,6.\cos(2\omega_1 t)$$

Le spectre est formé de 3 raies aux fréquences 0, 10 kHz et 20 kHz (distorsion harmonique)

$$3) s(t) = 2.[2\cos(\omega_1 t) + 2\cos(\omega_2 t)] + 0,3.[2\cos(\omega_1 t) + 2\cos(\omega_2 t)]^2$$

après application des formules de trigonométrie pour linéariser les termes en \cos^2 et en $\cos.\cos$, on trouve :

$$s(t) = 1,2 + 4\cos(\omega_1 t) + 4\cos(\omega_2 t) + 0,6\cos(2\omega_1 t) + 0,6\cos(2\omega_2 t) + 1,2\cos(\omega_1 + \omega_2)t + 1,2\cos(\omega_1 - \omega_2)t$$

- le spectre est formé de 7 raies aux fréquences : 0, 1, 10, 11, 20, 21 et 22 kHz
- les fréquences nouvelles 1 et 21 kHz liées à l'intermodulation sont apparues

4) **Conclusion** : une caractéristique de transfert non linéaire produit :

- si on applique un signal sinusoïdal, de la distorsion harmonique
- si on applique deux signaux sinusoïdaux, de la distorsion d'intermodulation

► Efficacité d'une bobine de lissage

$$1) 2) U_0 = 12,7 \text{ V} \qquad U_2 = 8,5 \text{ V} \qquad U_4 = 1,7 \text{ V}$$

3) L'amplitude de l'harmonique n du courant s'obtient en divisant l'harmonique n de la tension par l'impédance à n.fo

- en continu, l'impédance du circuit se résume à sa résistance, donc $I_0 = U_0/R = 3,17 \text{ A}$
- à 2.fo, l'impédance vaut $Z_2 = 628 \Omega$ et donc $I_2 = 13,5 \text{ mA}$
- à 4.fo, l'impédance vaut $Z_4 = 1257 \Omega$ et donc $I_4 = 1,3 \text{ mA}$

$$4) \text{ les composantes de sortie valent : } V_0 = R.I_0 = 12,7 \text{ V} \qquad V_2 = R.I_2 = 54 \text{ mV} \qquad V_4 = R.I_4 = 5,4 \text{ mV}$$

La tension $v(t)$ est pratiquement formée d'une composante continue de 12,7 V et d'une ondulation sinusoïdale due à l'harmonique 2 de valeur crête-crête $2.54 = 108 \text{ mV}$

► Tension et courant dans un onduleur

$$1) f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = 5033 \text{ Hz} \approx 5 \text{ kHz}$$

Entre 0 et T/2, Th1 et Th4 conduisent, entre T/2 et T c'est Th2 et Th3 qui conduisent.

2) On utilise la décomposition en série de Fourier d'un signal carré +1/-1 (voir cours) :

$$I_1 = 1,27 \text{ A} \qquad I_3 = 0,42 \text{ A} \qquad I_5 = 0,25 \text{ A}$$

3) Le module de l'impédance du circuit RLC parallèle s'écrit :

$$Z = \frac{1}{\sqrt{R^2 + (C\omega - \frac{1}{L\omega})^2}}$$

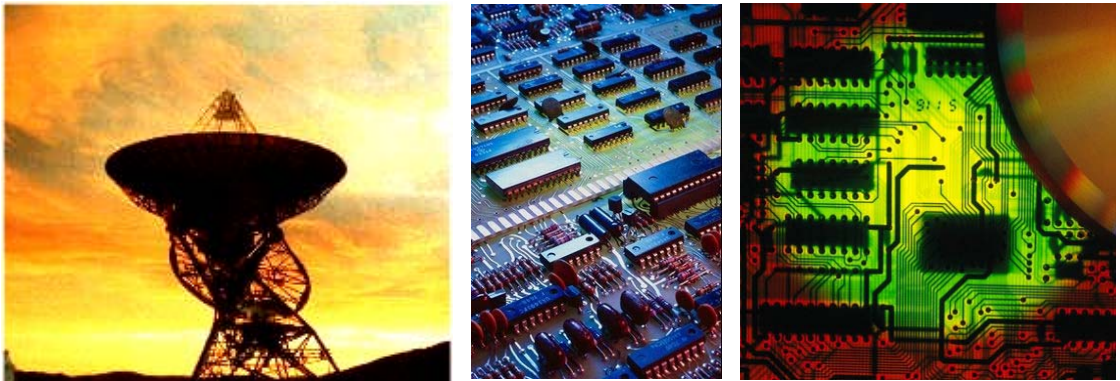
- pour le fondamental, le circuit est à la résonance, donc $Z_1 = R = 1000 \Omega$
- pour l'harmonique 3 (fréquence 15000 Hz) $Z_3 = 118 \Omega$
- pour l'harmonique 5 (fréquence 25000 Hz) $Z_5 = 62 \Omega$

4) Les composantes de la tension aux bornes de la charge se calculent facilement :

$$V_1 = R.I_1 = 1270 \text{ V} \qquad V_3 = Z_3.I_3 = 50 \text{ V} \qquad V_5 = Z_5.I_5 = 15,5 \text{ V}$$

Le taux de distorsion est de $t_d = 4\%$, la tension aux bornes de la charge est presque sinusoïdale.

Questionnaire



jean-philippe muller



Questions

1 Le spectre d'un signal sinusoïdal :

- a) se calcule avec la décomposition en série de Fourier
- b) permet de vérifier si tous les harmoniques sont aux bonnes fréquences
- c) peut être visualisé avec un analyseur à balayage
- d) peut être visualisé avec un analyseur FFT

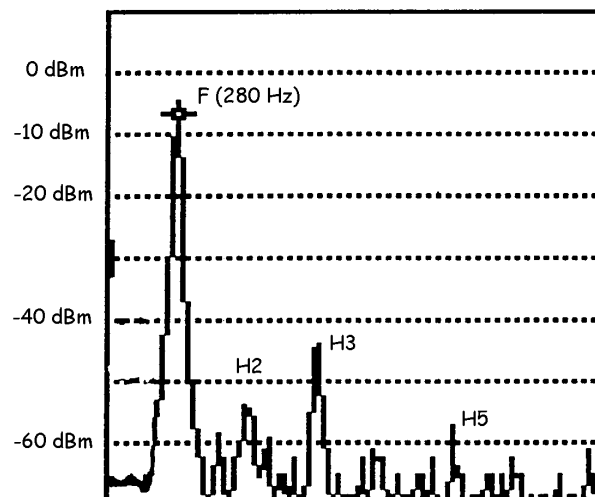
Vrai	Faux
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

2 Le spectre d'un signal peut être obtenu de différentes manières, et avec différents équipements, qui ont chacun leurs avantages et leurs inconvénients :

- a) un scope numérique équipé de la fonction FFT permet de visualiser le spectre
- b) un analyseur à balayage ne fonctionne qu'aux fréquences élevées
- c) un analyseur numérique ne fonctionne qu'aux fréquences basses
- d) les spectres les plus intéressants sont les spectres dont la forme est stable
- e) un PC équipé d'un logiciel adéquat permet de voir le spectre d'un signal
- f) les analyseurs numériques doivent d'abord échantillonner le signal

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

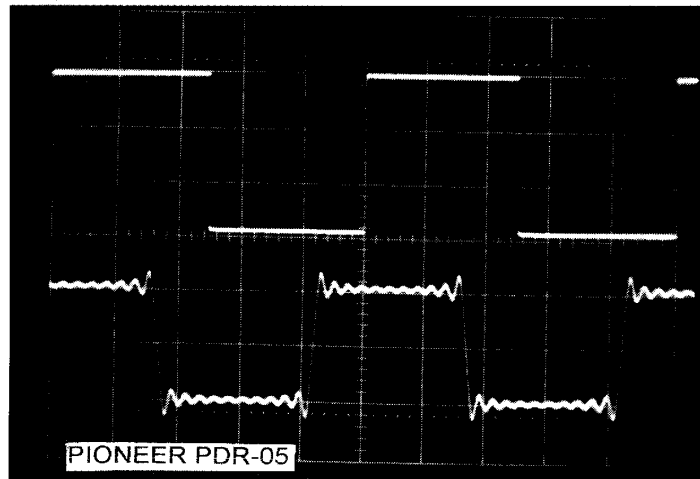
3 L'analyse du spectre en sortie d'un oscillateur fournissant une tension sinusoïdale à la fréquence 280 Hz a donné le résultat suivant :



- a) le signal produit par l'oscillateur est parfaitement sinusoïdal
- b) l'harmonique principal est l'harmonique 3
- c) le taux de distorsion est de 1,4 %
- d) on peut améliorer la qualité du signal avec un filtre passe-bas

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

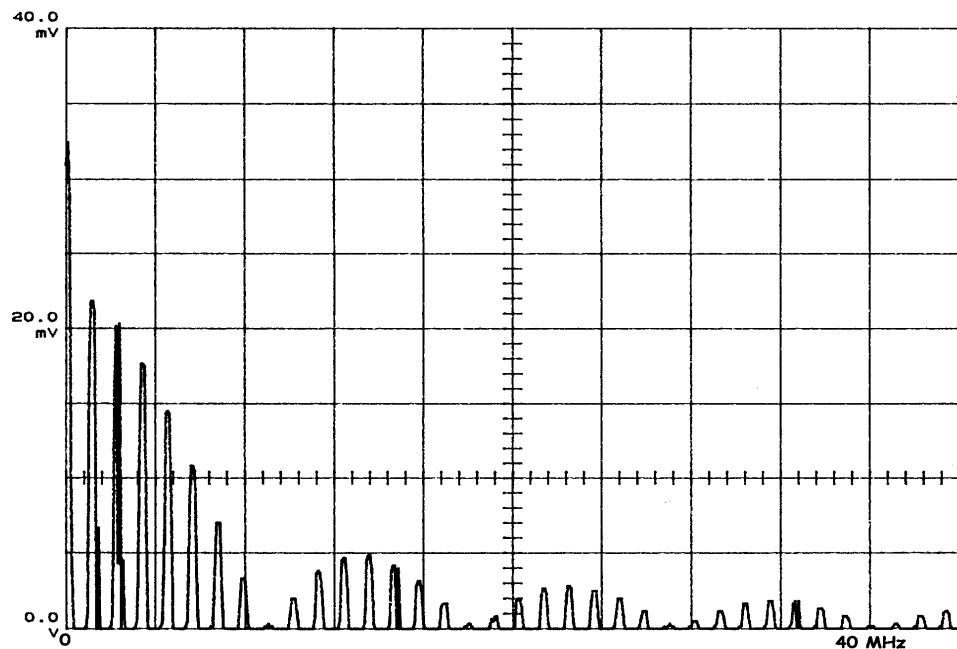
4 L'enregistrement ci-dessous représente la réponse du lecteur de disques compacts PIONEER PDR-05 à un signal carré à 1 kHz enregistré sur un disque test.



- a) le déphasage introduit n'est absolument pas gênant
- b) l'harmonique de rang le plus élevé contenu dans le signal est l'harmonique 21
- c) la coupure au-dessus de 20kHz est du premier ordre
- d) cette déformation est perceptible par une oreille exercée

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

5 On a enregistré le spectre ci-dessous



- a) ce n'est pas un signal périodique car certaines raies sont nulles
- b) la forme du spectre est celle d'un train d'impulsions
- c) la fréquence des impulsions est de l'ordre de 140 kHz
- d) la largeur des impulsions est de 2 μ s

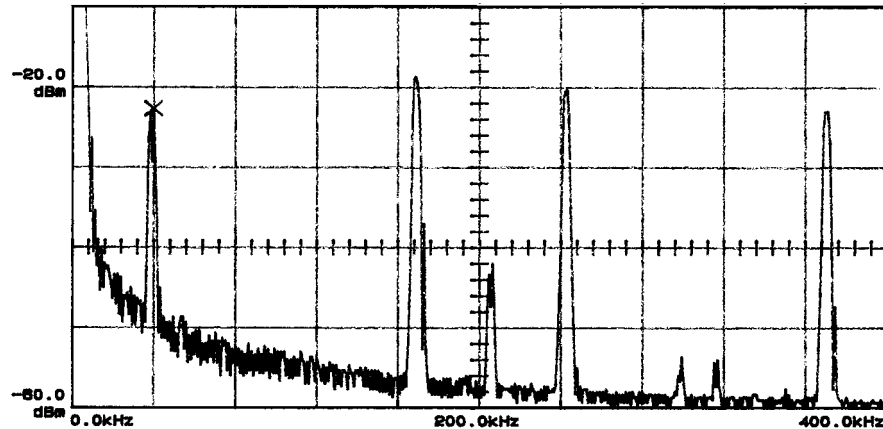
Vrai	Faux
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

6 Un signal sinusoïdal de fréquence $F=250$ Hz est échantillonné à $f_e=1$ kHz :

- a) le spectre du signal échantillonné ne contient plus de 250 Hz
- b) le spectre contient entre-autres du 250Hz, du 750 Hz et du 1250 Hz
- c) le spectre du signal échantillonné contient beaucoup plus que 3 fréquences

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

7 Le spectre ci-dessous est celui d'un signal échantillonné à $f_e = 200$ kHz environ :

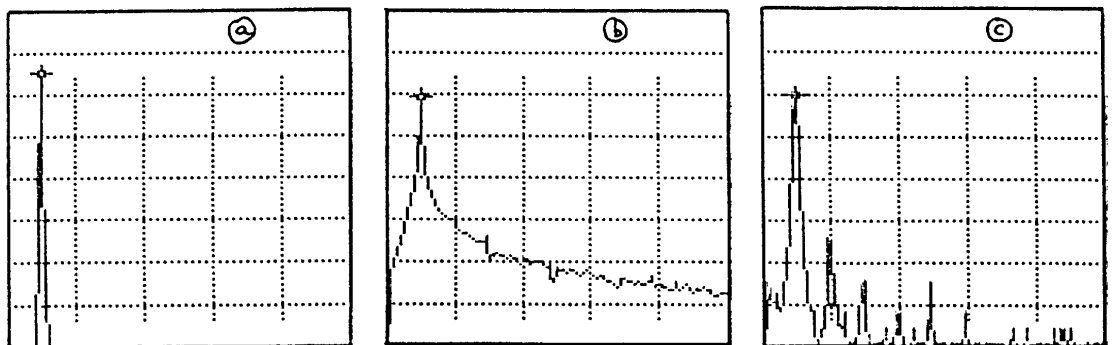


- a) on ne peut le faire que si le spectre du signal ne dépasse pas les 100 kHz
- b) le signal échantillonné était carré de fréquence 40 kHz
- c) la raie à 200 kHz traduit un défaut de l'échantillonneur

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

8 En sortie d'un générateur basse-fréquence sinusoïdal réglé sur la fréquence de 1 kHz, on a relevé les 3 spectres suivants :

- échelle des amplitudes linéaire
- ----- logarithmique avec fenêtre rectangulaire
- ----- de Hanning

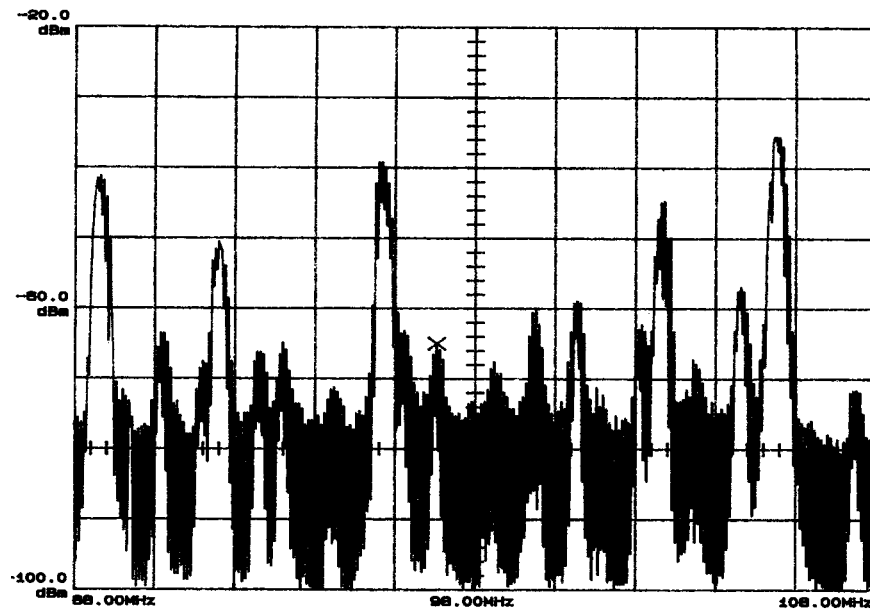


- a) avec une échelle linéaire, le signal est plus pur qu'avec une échelle logarithmique
- b) la fenêtre de Hanning permet de mettre en évidence les défauts du signal
- c) le signal issu du GBF présente de la distorsion

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

9 Voici le spectre du signal reçu par une antenne dans une partie de la bande FM. La largeur du filtre d'analyse a été fixé pour ce relevé à RBW = 300 kHz.

$f_{centrale}$: 98 MHz
Span : 1 MHz/div

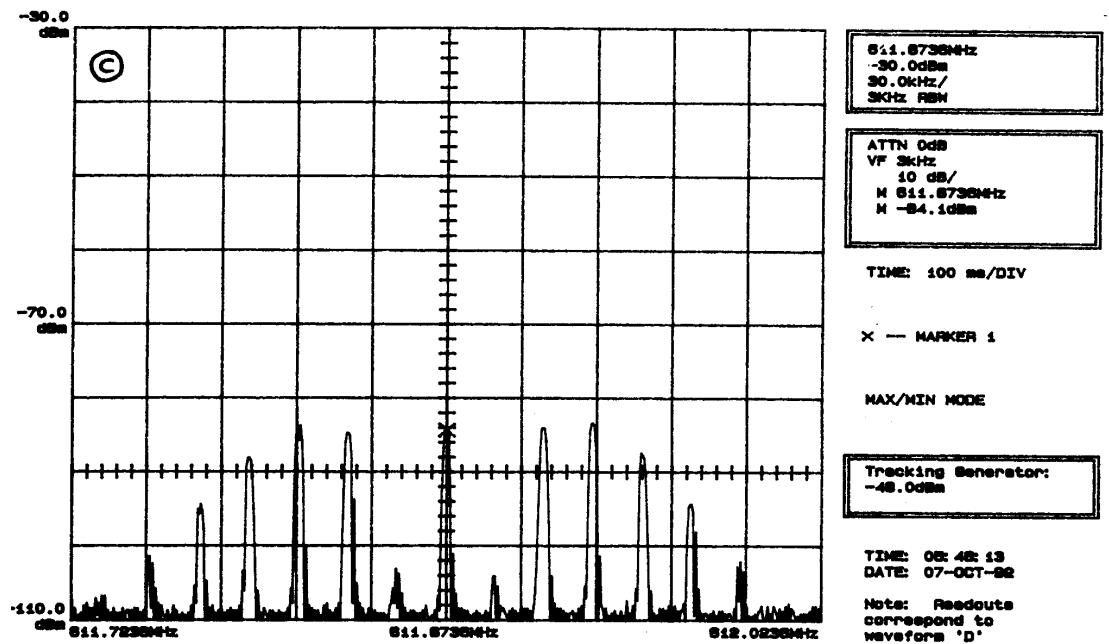


- a) chaque raie représente un émetteur
- b) la hauteur de la raie ne dépend que de la puissance de l'émetteur
- c) sachant qu'un émetteur occupe 250 kHz environ, la largeur RBW du filtre d'analyse est bien choisie pour mesurer l'encombrement spectral d'un émetteur
- d) plus il y a d'émetteurs, plus il y a de puissance consommée et plus l'amplitude de la raie diminue : c'est le principe de fonctionnement de l'audimat

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

10 On a relevé le spectre d'un signal modulé en fréquence :

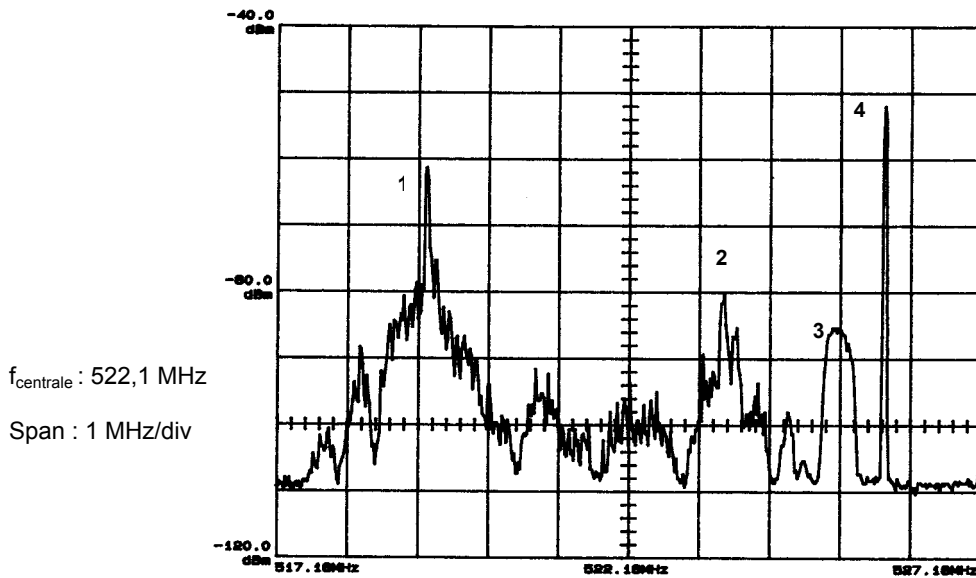
$f_{centrale}$: 511,87 MHz
Span : 30 kHz/div



- a) la fréquence de la porteuse est de 512 MHz environ
- b) le spectre d'un signal modulé en fréquence est toujours symétrique
- c) l'encombrement spectral est de l'ordre de 240 kHz

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

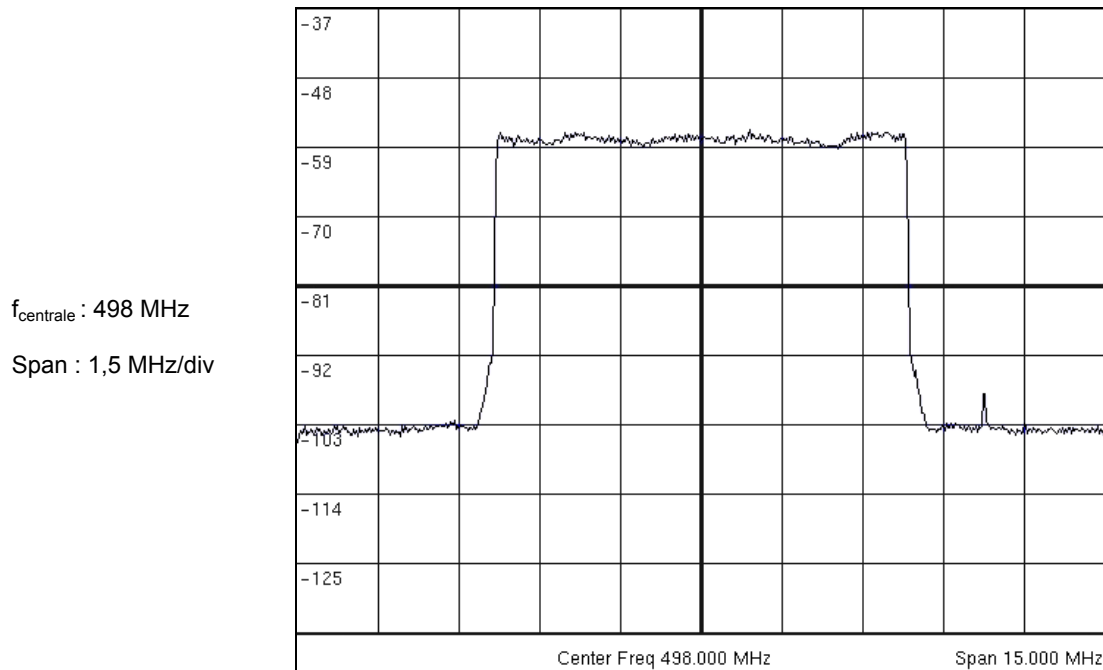
11 Le spectre d'une émission TV analogique (France 3 Mulhouse) se décompose en : 1-porteuse image, 2-sous-porteuse couleur, 3-son Nicam, 4-son analogique.



- a) la fréquence de la porteuse image est de 519,25 MHz
- b) l'écart porteuse image / son analogique est de 6,5 MHz
- c) le son numérique (Nicam) est moins encombrant que le son analogique
- d) l'encombrement spectral d'un émetteur TV est de 8 MHz environ

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

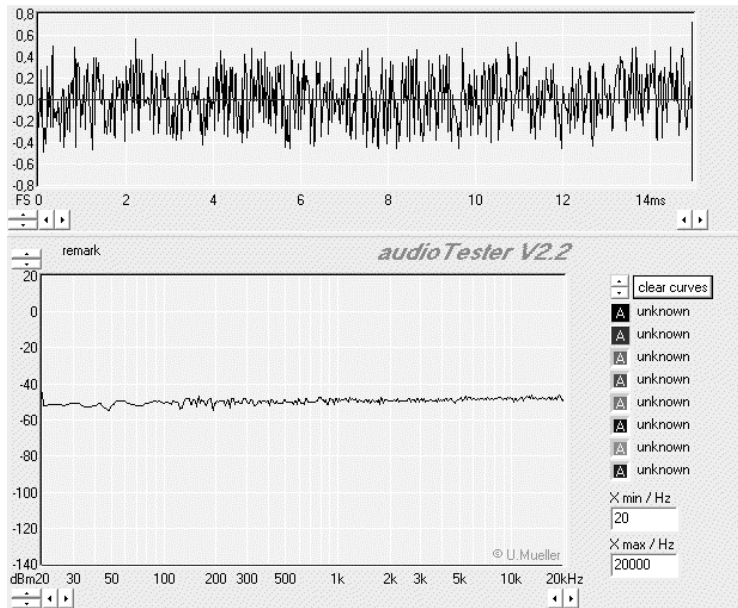
12 Le spectre enregistré est celui d'une émission de télévision numérique terrestre TNT :



- a) la bande occupée par un émetteur TNT est de 8 MHz, la même qu'en TV analogique
- b) le canal est utilisé de façon optimale

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

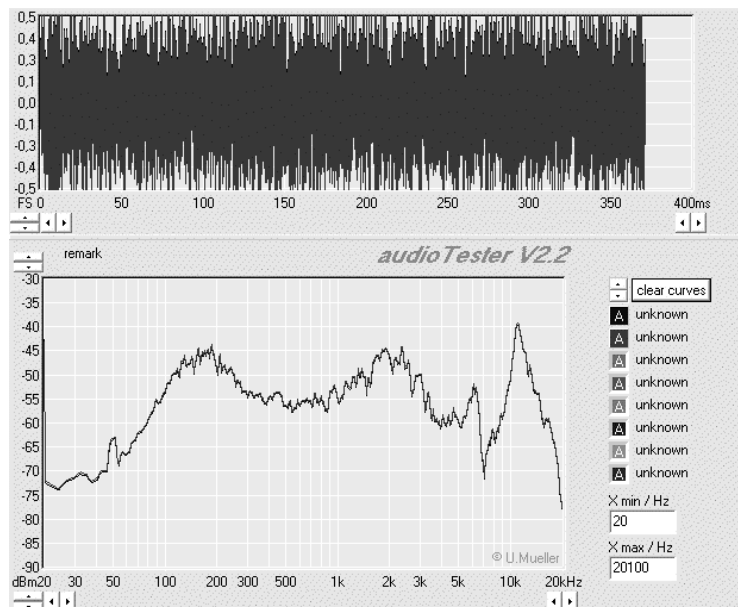
13 Le spectre relevé est celui d'un générateur de bruit :



- a) l'oscillogramme montre qu'il s'agit d'un bruit noir
- b) le spectre montre qu'il ne contient aucune fréquence
- c) le spectre montre que toutes les fréquences sont présentes en amplitudes égales
- d) le rayonnement du soleil a les mêmes propriétés spectrales que ce bruit

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

14 Ce bruit est injecté dans un ampli de bonne qualité relié à une enceinte acoustique. Le son de l'enceinte est capté par un microphone de mesure et visualisé sur un analyseur de spectre :



- a) le spectre en sortie montre les faiblesses de l'enceinte à certaines fréquences
- b) en-dessous de 100 Hz l'enceinte est incapable de reproduire les sons
- c) le spectre montre la courbe de réponse de l'enceinte

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



Réponses

N°	Réponses justes	Commentaires
1	c, d	a) un signal sinusoïdal a un spectre formé d'une seule raie, tout calcul est inutile b) un signal sinusoïdal n'a pas d'harmoniques
2	a, c, e, f	b) les analyseurs à balayage fonctionnent des très basses fréquences jusqu'aux très hautes fréquences d) les signaux à spectres variables (voix, signaux modulés) sont en général plus intéressant que les signaux à spectre fixe
3	b, c et d	a) le signal n'est pas sinusoïdal puisque son spectre contient des harmoniques.
4	a et b	c) on compte 21 ondulations dans une période, qui correspondent à l'harmonique 21. L'harmonique 23 est absent, ce qui veut dire que la pente de la coupure est très importante, et l'ordre bien plus élevé qu'un premier ordre. d) l'oreille n'entend plus au-delà de 20 kHz, elle est donc insensible à la présence ou à l'absence des harmoniques au-delà de cette fréquence
5	b	a) les raies sont régulièrement espacées, c'est donc un signal périodique. c) l'harmonique 32 est à 40 MHz, le fondamental est donc à $40/32 = 1,25$ MHz d) l'enveloppe passe par un premier zéro à 10 MHz, la largeur de l'impulsion vaut donc $\Delta t = 1/10\text{MHz} = 100\text{ns}$
6	b et c	a) le spectre contient toutes les fréquences de la forme $nf_e \pm F$
7	a et c	b) la présence d'une seule raie entre 0 et 100 kHz montre que le signal échantillonné est sinusoïdal
8	b et c	a) la pureté du signal ne dépend bien-sûr pas des réglages de l'analyseur. En choisissant un affichage en dB et une fenêtre adéquate, on visualise de façon correcte les défauts du signal
9	a	b) la hauteur de la raie dépend de la puissance de l'émetteur et de son éloignement c) avec $\text{RBW} = 300\text{kHz}$, les raies sur l'écran ont forcément 300 kHz de large, ce qui ne permet pas de conclure sur la largeur d'un émetteur d) la puissance absorbée par un récepteur radio est extrêmement faible et n'a pas d'influence sur la hauteur de la raie.
10	a, b et c	Un signal modulé est toujours symétrique de part et d'autre de la porteuse, sauf si on le filtre comme en TV (modulation à bande latérale résiduelle)
11	a, b et d	c) le son numérique (Nicam) est plus encombrant que le son analogique
12	a et b	
13	c	a) et b) ce signal contient toutes les fréquences sans en privilégier aucune, on l'appelle bruit blanc, par analogie avec la lumière blanche qui contient toutes les couleurs en proportion égale d) le soleil émet davantage d'énergie dans le visible que dans l'IR ou le domaine radio, son spectre d'émission n'est donc pas plat
14	a, b et c	