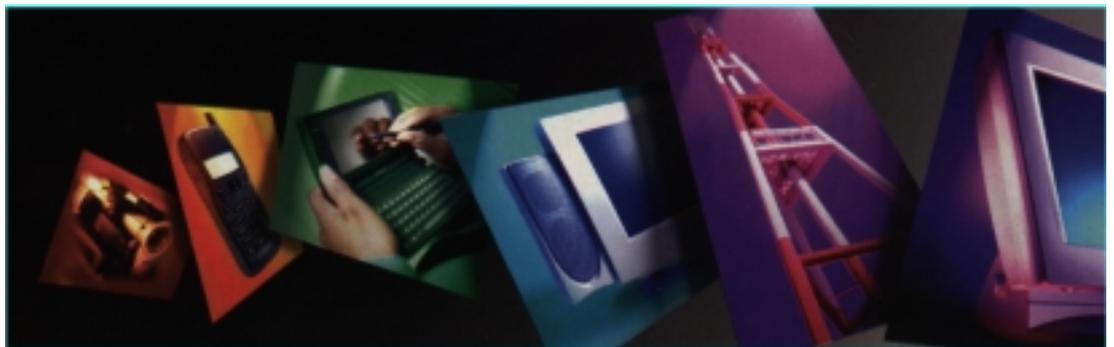




# Analyse spectrale des signaux radiofréquence



---

Jean-Philippe MULLER

Décembre 2000

## Sommaire

### Principe du changement de fréquence

- 1) Les différents types d'analyseurs de spectre
- 2) Changement de fréquence d'un signal RF par mélange
- 3) Le changement de fréquence dans un récepteur
- 4) Le changement de fréquence dans un tuner FM
- 5) Structure des mélangeurs
- 6) Exemple du mélangeur à transistor LM1496
- 7) Exemple du mélangeur Schottky ML1

### Principe de fonctionnement de l'analyseur RF

- 8) Structure interne de l'analyseur de spectre RF
- 9) Les étages de l'analyseur de spectre RF
- 10) Fonctionnement du système
- 11) La mesure de fréquence et de niveau
- 12) La résolution de l'analyseur
- 13) La sensibilité et le niveau de bruit

### Les applications de l'analyse spectrale RF

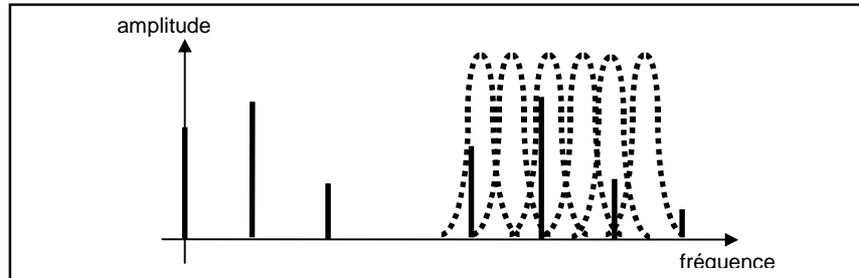
- 14) Contrôle d'un émetteur
- 15) Mesures de compatibilité électromagnétique
- 16) Caractérisation de signaux modulés en amplitude
- 17) Caractérisation de signaux multiplexés TDMA
- 18) Visualisation de courbes de réponses

## 1) Les différents types d'analyseurs de spectre :

Suivant la gamme de fréquences contenues dans le signal à analyser, trois techniques de détermination du spectre sont utilisées aujourd'hui et correspondent à 3 grandes familles d'analyseurs de spectre :

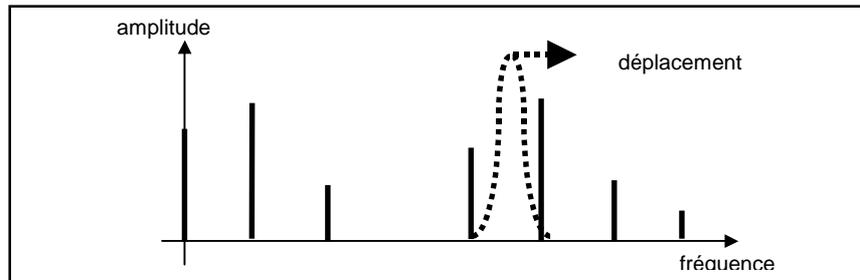
- les analyseurs par bande constitués par une batterie de filtres sélectifs juxtaposés utilisés essentiellement dans le domaine audio

Figure 1.  
Analyseur à banque de filtres sélectifs.



- les analyseurs dans lesquels c'est un filtre sélectif de fréquence centrale variable qui se déplace sur l'axe des fréquences pour analyser la bande

Figure 2.  
Analyseur à filtre sélectif variable.

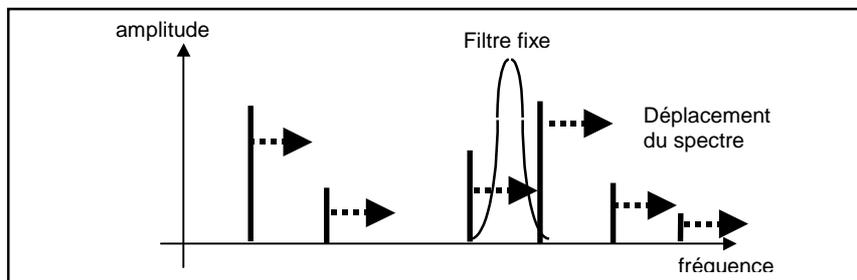


- les analyseurs numériques à transformée de Fourier discrète pour les fréquences basses (inférieures à 10 MHz environ).

Le calcul de la transformée de Fourier discrète revient en fait à faire passer le signal dans une batterie de filtres numériques juxtaposés, ce qui veut dire que l'analyseur FFT travaille comme l'analyseur à banc de filtres juxtaposés.

- les analyseurs à changement de fréquence pour les signaux de fréquences plus élevée (jusqu'à 60 GHz actuellement)

Figure 3.  
Analyseur à changement de fréquence.



Dans ces analyseurs, on fait déplacer le spectre à analyser devant un filtre sélectif qui est fixe.

Nous verrons successivement dans cet exposé comment on peut faire bouger un spectre sur l'axe des fréquences, puis le fonctionnement de l'analyseur à changement de fréquence.

## 2) Changement de fréquence d'un signal RF par mélange :

Le mélangeur est un dispositif à deux entrées et une sortie qui effectue sur les signaux appliqués sur les entrées une opération non-linéaire de multiplication.

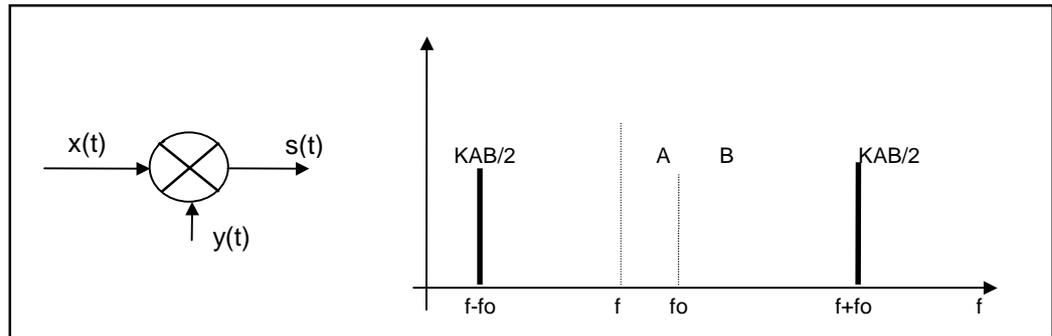
Dans un système linéaire comme un filtre par exemple, on retrouve en sortie des fréquences identiques à celles qui ont été injectées à l'entrée.

Un dispositif non-linéaire par contre fait apparaître en sortie des fréquences nouvelles inexistantes dans les signaux d'entrée.

Ces nouvelles fréquences sont évidemment liées mathématiquement aux fréquences d'entrée.

Le cas le plus simple concerne le mélange de deux signaux sinusoïdaux.

Figure 4.  
Mélange de deux signaux sinusoïdaux



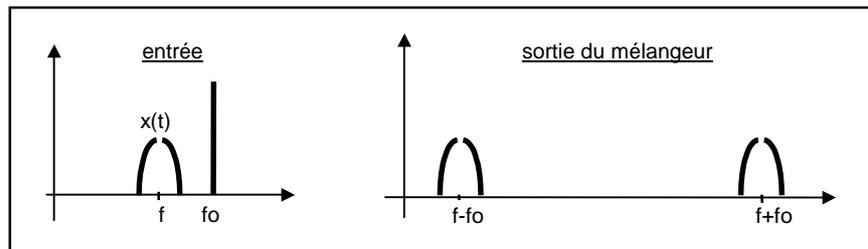
On obtient en sortie le signal suivant :

$$s(t) = K.x(t).y(t) = K.A\cos(\omega t).B\cos(\omega_0 t) = \frac{KAB}{2}.\cos(\omega + \omega_0)t + \frac{KAB}{2}.\cos(\omega - \omega_0)t$$

Le spectre en sortie est donc composé de deux raies aux **fréquences somme et différence**.

Dans l'utilisation du mélangeur dans un récepteur, le signal  $x(t)$  est un signal modulé en amplitude, en fréquence ou en numérique centré sur  $\omega$  et  $y(t)$  est un signal de fréquence  $f_0$  provenant d'un oscillateur appelé oscillateur local.

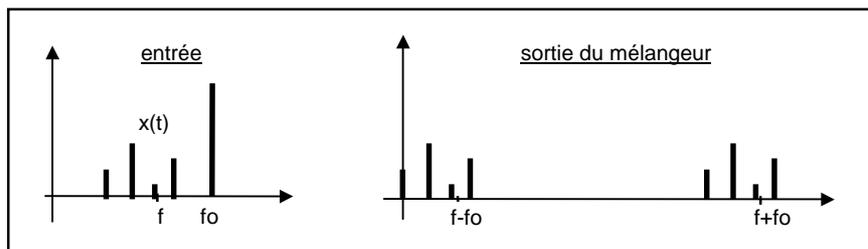
Figure 5.  
Mélange d'un signal modulé avec un signal sinusoïdal



En sortie du mélangeur, on retrouve comme précédemment le spectre du signal  $x(t)$  centré sur les fréquences  $f-fo$  et  $f+fo$ .

Dans l'utilisation du mélangeur dans un analyseur de spectre, le signal  $x(t)$  est le signal à analyser caractérisé par son spectre.

Figure 6.  
Mélange d'un signal complexe avec un signal sinusoïdal.



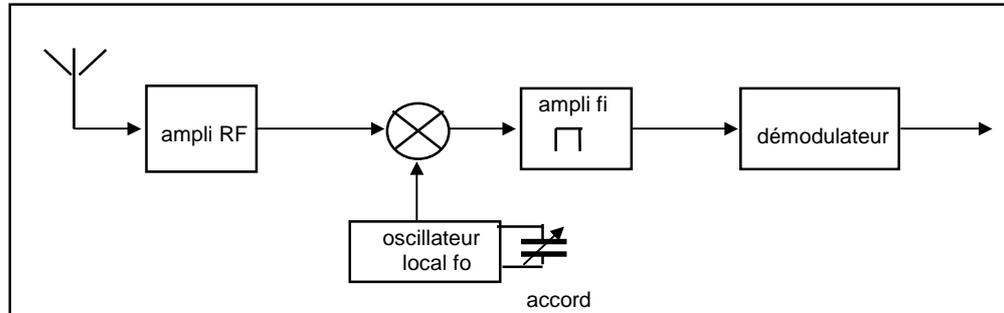
### 3) Le changement de fréquence dans un récepteur :

A la **réception**, il s'agit de sélectionner l'émetteur qu'on souhaite recevoir. Pour cela, la solution d'un filtre sélectif n'est guère utilisée parce que ce filtre doit avoir des caractéristiques très difficiles à concilier:

- fréquence centrale variable
- largeur fixe égale à l'encombrement spectral de l'émetteur

Pour contourner cette difficulté, on utilise presque systématiquement la structure à changement de fréquence.

Figure 7.  
Principe du récepteur à changement de fréquence



Le mélangeur reçoit les signaux provenant de l'antenne et les multiplie par un signal sinusoïdal issu d'un oscillateur local. On obtient en sortie un spectre assez riche, puisque pour chaque émetteur capté à la fréquence  $f$ , on a en sortie du mélangeur le même signal, mais aux fréquences  $f-f_0$  et  $f+f_0$ .

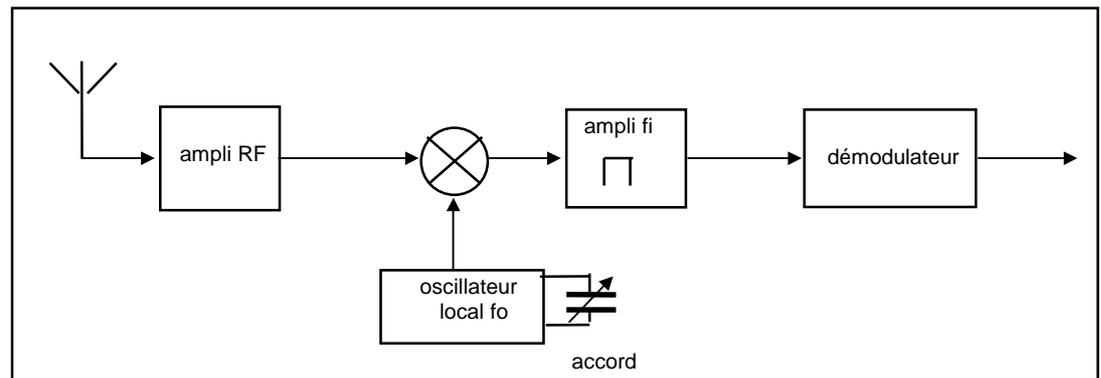
Pourtant un seul de ces signaux à la fréquence  $f-f_0$  tombera dans la bande passante du filtre  $f_i$  et sera donc démodulé. On sélectionne donc l'émetteur désiré en agissant sur  $f_0$ , et le filtre de fréquence intermédiaire à  $f_i$  est fixe.

Cette structure quasi idéale a néanmoins un petit inconvénient, à savoir que 2 émetteurs seront reçus pour une valeur donnée de l'oscillateur local  $f_0$ .

Pour l'émetteur de France-Inter à  $f = 95,7$  MHz et pour un oscillateur local réglé à  $f_0 = 85$  MHz, la fréquence  $f' = f_0 - f_i = 74,3$  MHz mélangée à 85 MHz tombera aussi à 10,7 MHz.

Cette deuxième fréquence  $f'$  est appelée **fréquence image de  $f$** . On voit que l'émetteur est séparé de son image par un intervalle égal à  $2.f_i$ .

Figure 8.  
Fréquence image d'une émission.



L'émetteur image doit être filtré dès l'entrée du récepteur, ce qui est d'autant plus facile que l'intervalle est important.

On choisit donc dans la pratique une fréquence intermédiaire suffisamment élevée :

- bande FM :  $f_i = 10,7$  MHz pour une réception autour de 100 MHz
- bande PO :  $f_i = 455$  kHz ..... 1 MHz
- bande TV :  $f_i = 38,9$  MHz ..... de 400 à 800 MHz
- bande GSM :  $f_i = 70$  à 250 MHz ..... autour de 900 MHz

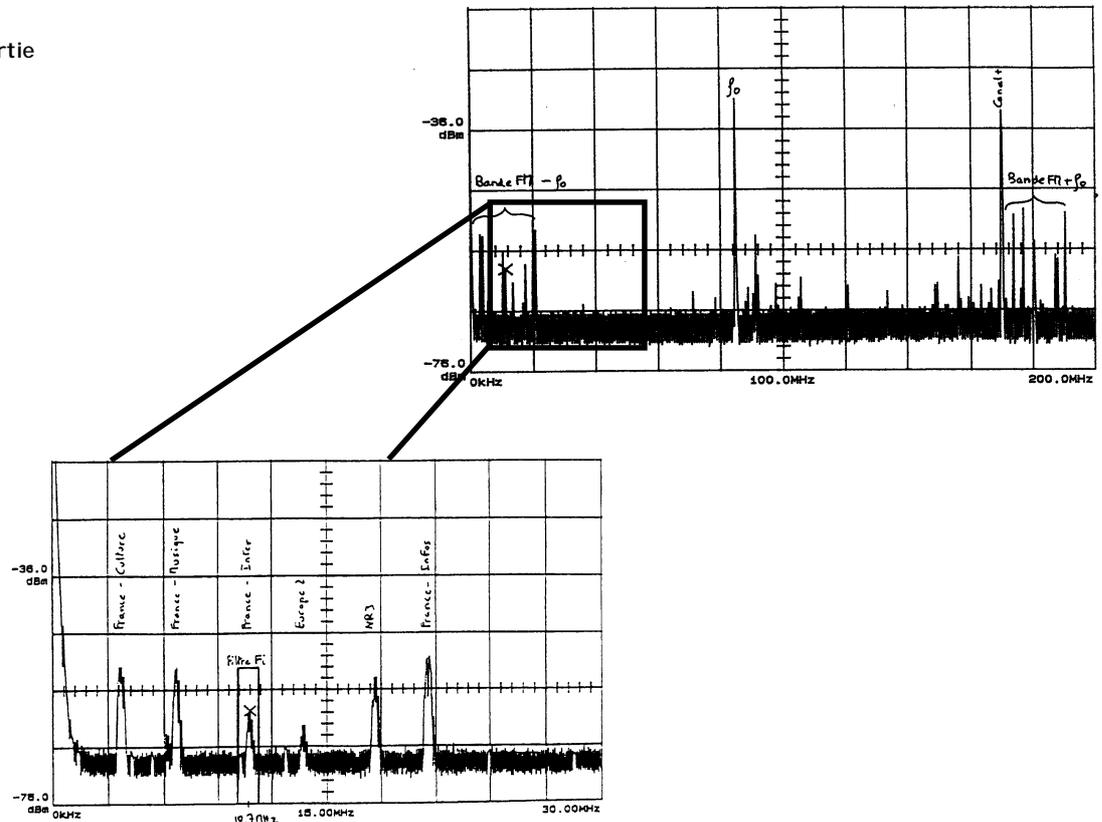
L'amplificateur RF d'entrée sera sélectif et aura pour tâche d'éliminer un éventuel émetteur placé à la fréquence image.

#### 4) Le changement de fréquence dans un tuner FM :

Cette technique de sélection d'un émetteur est universelle et utilisée dans la réception radio, TV, téléphone cellulaire etc ... et dans les analyseurs de spectre à changement de fréquence.

Voici l'allure du spectre en sortie du mélangeur dans un récepteur FM :

Figure 9.  
Spectre en sortie  
du mélangeur  
dans un  
récepteur FM  
accordé sur  
France-Inter



Dans un récepteur FM, l'ensemble des émetteurs de la bande FM reçus par l'antenne se trouve multiplié par l'oscillateur local  $f_0$ .

On retrouve donc en sortie du mélangeur la bande FM à deux endroits :

- à la fréquence différence (basse) où se trouve le filtre  $f_i$
- à la fréquence somme (élevée)

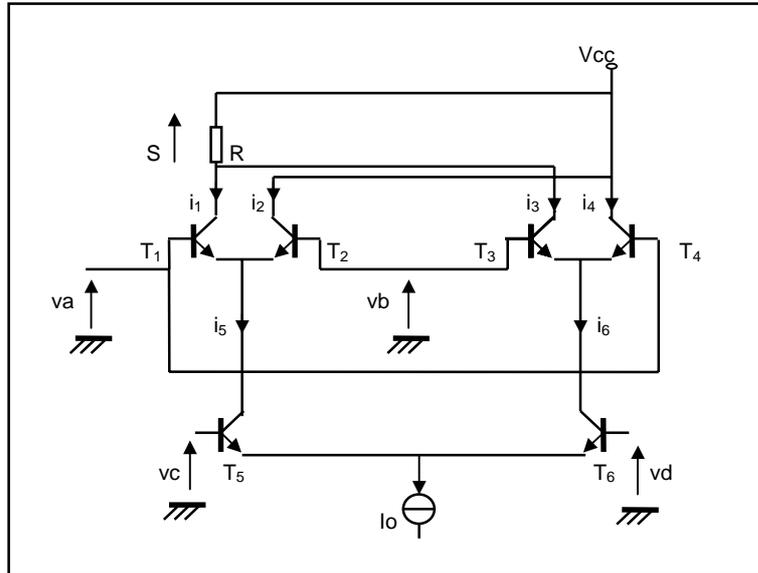
En changeant la fréquence de l'oscillateur local, on déplace la bande devant le filtre  $f_i$  qui est fixe.

C'est ce même principe qui est utilisé dans un analyseur de spectre à changement de fréquence pour faire défiler les différentes composantes spectrales du signal devant le filtre sélectif d'analyse fixe.

### 5) Structure des mélangeurs :

La **cellule de Gilbert** est le montage de **mélangeur à transistors** le plus utilisé parce que facilement intégrable . Avec les techniques actuelles, on peut réaliser ce type de mélangeur jusqu'à quelques gigahertz.

Figure 10.  
Structure du mélangeur de Gilbert.



Pour chaque transistor, le courant collecteur  $i_c$  est lié à la tension base-émetteur  $v$  par la relation :

$$I = I_0 \exp(\lambda v) \quad \text{avec} \quad \lambda = q/kT = 40 \text{ à la température ambiante}$$

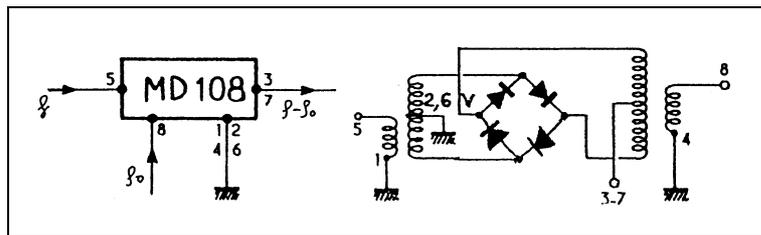
Si on pose  $x = v_a - v_b$  et  $y = v_d - v_c$  et si on suppose que  $\lambda x$  et  $\lambda y$  sont petites devant 1, on a :

$$s(t) = -0,25.R.I_0.\lambda^2 xy$$

On constate que le signal de sortie est de la forme  $Kxy$  qui traduit bien la fonction de multiplieur analogique.

Le **mélangeur Schottky** utilise la non-linéarité de diodes pour faire le mélange. Il est le plus souvent constitué de quatre diodes montées en anneau et de deux transformateurs permettant d'attaquer les diodes de façon convenable.

Figure 11.  
Structure du mélangeur Schottky à diodes



On démontre que si les signaux d'entrée ont un niveau optimal, la tension de sortie s'écrit :

$$s(t) = 4.r.I.\lambda.x.y \quad \text{si } r \text{ est la résistance de charge}$$

Contrairement aux mélangeurs à transistors qui peuvent apporter un gain de conversion, les mélangeurs à diodes sont passifs et introduisent donc automatiquement une atténuation d'au moins 6 dB pour l'une ou l'autre des raies utilisées en sortie ( $f+f_0$  ou  $f-f_0$ ).

Le fabricant indique aussi un niveau limite pour l'autre entrée appelé point de compression qui donne un ordre de grandeur du niveau maximal à ne pas dépasser si on veut rester dans le domaine de distorsion quadratique.

Aux fréquences supérieures à 2 GHz, les mélangeurs à transistors restent encore coûteux et on utilise plus volontiers les mélangeurs à diodes Schottky qui existent dans le commerce jusqu'à des fréquences supérieures à 50 GHz.

## 6) Exemple du mélangeur à transistor LM1496 :

### General Description

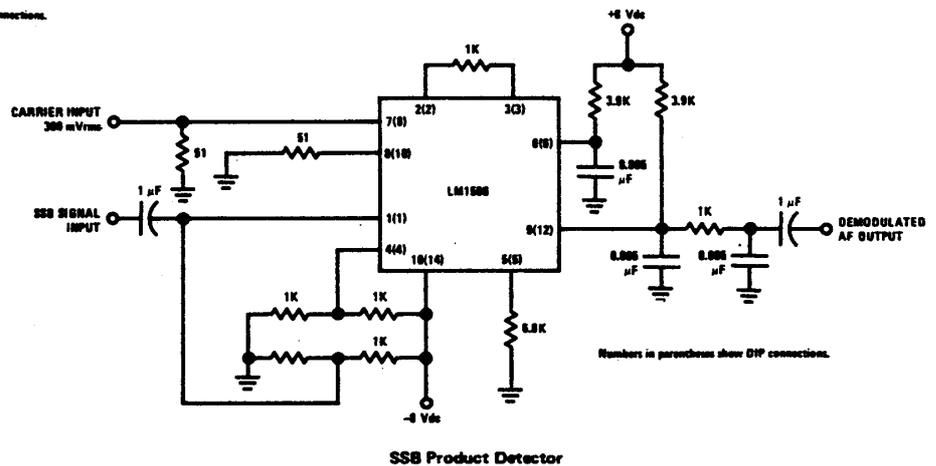
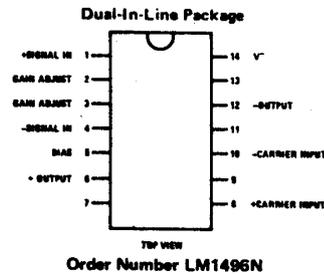
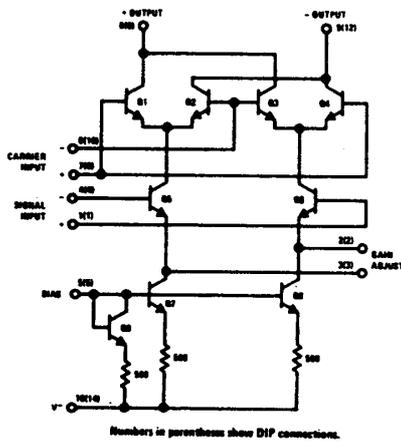
The LM1596/LM1496 are double balanced modulator-demodulators which produce an output voltage proportional to the product of an input (signal) voltage and a switching (carrier) signal. Typical applications include suppressed carrier modulation, amplitude modulation, synchronous detection, FM or PM detection, broadband frequency doubling and chopping.

The LM1596 is specified for operation over the  $-55^{\circ}\text{C}$  to  $+125^{\circ}\text{C}$  military temperature range. The LM1496 is specified for operation over the  $0^{\circ}\text{C}$  to  $+70^{\circ}\text{C}$  temperature range.

### Features

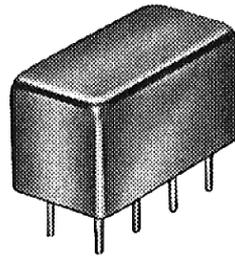
- Excellent carrier suppression
  - 65 dB typical at 0.5 MHz
  - 50 dB typical at 10 MHz
- Adjustable gain and signal handling
- Fully balanced inputs and outputs
- Low offset and drift
- Wide frequency response up to 100 MHz

### Schematic and Connection Diagrams



This figure shows the LM1596 used as a single sideband (SSB) suppressed carrier demodulator (product detector). The carrier signal is applied to the carrier input port with sufficient amplitude for switching operation. A carrier input level of 300 mVrms is optimum. The composite SSB signal is applied to the signal input port with an amplitude of 5.0 to 500 mVrms. All output signal components except the desired demodulated audio are filtered out, so that an offset adjustment is not required. This circuit may also be used as an AM detector by applying composite and carrier signals in the same manner as described for product detector operation.

7) Exemple du mélangeur Schottky ML1 :



**ML-1 DOUBLE BALANCED MIXER**  
**SPECIFICATIONS**

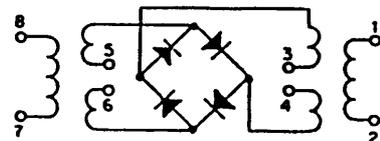
**Features**

Coverage from dc to 500 Mhz  
6-dB conversion loss  
40 dB isolation  
PC board mounting  
EMI shielding

<u>Frequency range, Mhz</u>	RF and LO ports	5-500	
	IF port	DC-500	
<u>Conversion Loss, dB</u>	<u>Typical</u>	<u>Maximum</u>	
One octave from band edge	5.5	7.5	
Total range	6.5	8.5	
<u>LO Power</u>	+ 7 dBm		
<u>Signal 1 dB Compression Level</u>	+ 1 dBm		
<u>Isolation, dB</u>	<u>Typical</u>	<u>Minimum</u>	
Lower band edge to	LO-RF	50	45
one decade higher	LO-IF	45	30
Mid range	LO-RF	45	40
	LO-IF	40	25
Upper band edge to	LO-RF	35	25
one octave lower	LO-IF	30	20
<u>Total input power :</u>	50mW		
<u>Total input current, peak :</u>	40 mA		
<u>Operating &amp; Storage Temperature :</u>	- 55°C to + 100°C		

**Pin Connections**

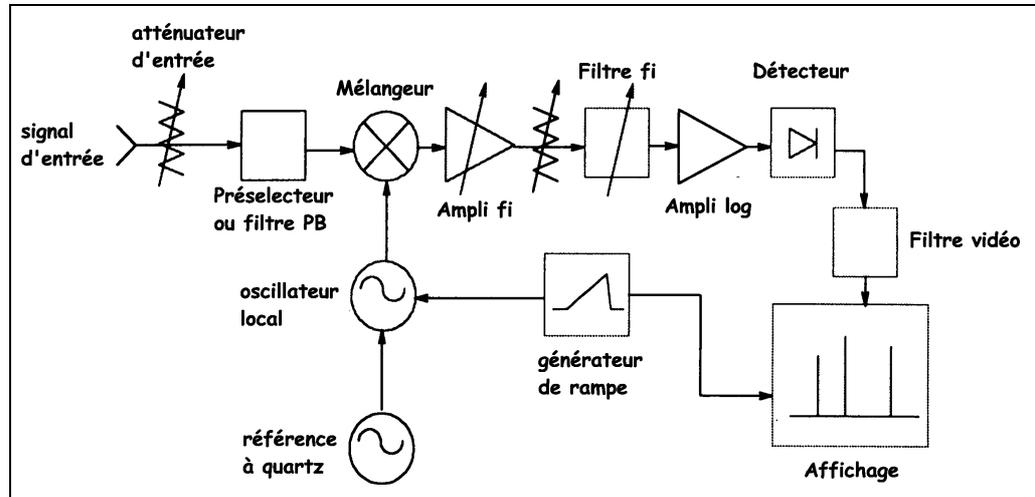
LO	8
RF	1
IF	3, 4
Ground	2, 5, 6, 7
Case ground	2



## 8) Structure de l'analyseur de spectre RF :

Les analyseurs de spectres RF ne sont pas fondamentalement différents d'un récepteur radio, sauf que le balayage de la gamme de fréquence est automatique et non manuel, et que le signal de sortie n'est pas envoyé sur un haut-parleur mais sur un dispositif d'affichage.

Figure 12.  
Structure interne d'un analyseur RF



Le cœur du système est le **mélangeur** qui multiplie le signal à analyser par un signal sinusoïdal issu d'un oscillateur local  $f_0$ .

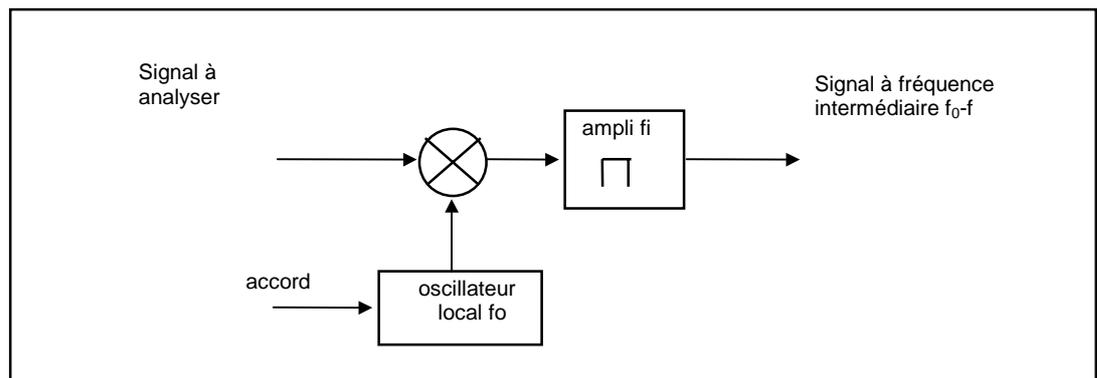
En sortie du mélangeur on obtient les fréquences somme et différence, qui seule nous intéresse.

Le signal à analyser se trouve donc déplacé de sa fréquence initiale  $f$  à une nouvelle fréquence appelée fréquence intermédiaire  $f_i = f_0 - f$ .

Prenons comme exemple un analyseur de spectre dont les caractéristiques seraient les suivantes :

- gamme couverte :  $f$  va de 0 à 1 GHz
- fréquence intermédiaire :  $f_i = 1,2$  GHz
- gamme de l'oscillateur local :  $f_0$  va de 1,2 à 2,2 GHz
- signal à analyser : deux raies à 500 et 580 MHz

Figure 13.  
Exemple pratique du rôle du mélangeur



En sortie du mélangeur, le signal est amplifié et traverse le **filtre fi** passe-bande qui joue le rôle d'une « fenêtre » d'observation.

La bande passante de ce filtre  $f_i$  s'appelle bande passante de résolution (RBW : resolution bandwidth) et peut être choisie par l'utilisateur parmi plusieurs valeurs.

La valeur de la  $f_i$  est choisie élevée, au-dessus de la bande à analyser, pour que la fréquence image soit rejetée en-dehors de la bande utile.

## 9) Les autres étages de l'analyseur de spectre RF :

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**.

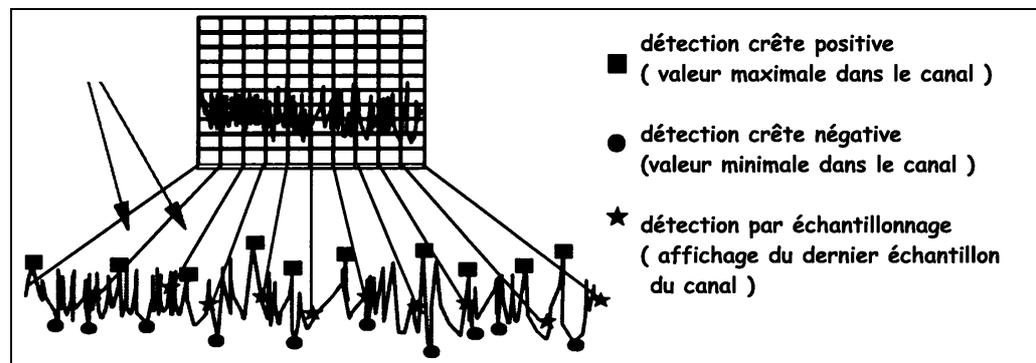
Le signal en sortie du filtre  $f_i$  a une amplitude qu'il va falloir afficher. Le **détecteur d'enveloppe** permet d'extraire cette information du signal  $f_i$ .

Les analyseurs de spectre actuels ont un affichage digital. L'extraction de l'amplitude se fait donc sur le signal  $f_i$  numérisé, ce qui permet un certain nombre de traitements numériques améliorant la qualité de l'affichage.

On dispose en général des modes de fonctionnement suivants :

- détecteur crête positive ( positive-peak detector mode)
- détecteur crête négative ( negative-peak detector mode)
- détecteur par échantillonnage ( sample detection mode )

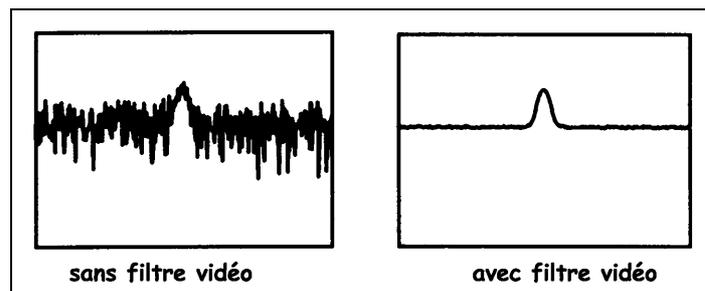
Figure 14.  
Les différents modes d'affichage



Le **filtre vidéo** est un filtre passe-bas placé entre le détecteur d'enveloppe et le dispositif d'affichage.

Il est utilisé pour moyenner ou lisser le signal affiché sur l'écran. Le signal analysé est toujours accompagné de bruit et il est possible, en choisissant la largeur du filtre vidéo (VBW video bandwidth) de faire émerger un signal faible du plancher de bruit.

Figure 15.  
Rôle du filtre vidéo



L'**oscillateur local** est un VCO ( voltage controlled oscillator ) qui détermine la fréquence analysée. Cet oscillateur est commandé par la rampe issue du générateur de rampe et cette rampe commande aussi le balayage en X de l'affichage.

L'**atténuateur RF d'entrée** permet de contrôler le niveau de signal à l'entrée du mélangeur. En effet ce composant ne doit pas être attaqué par un niveau excessif si on veut éviter les problèmes de compression de gain ( erreurs sur l'amplitude des raies ) et de distorsion (apparition de raies parasites n'existant pas dans le signal analyseur ).

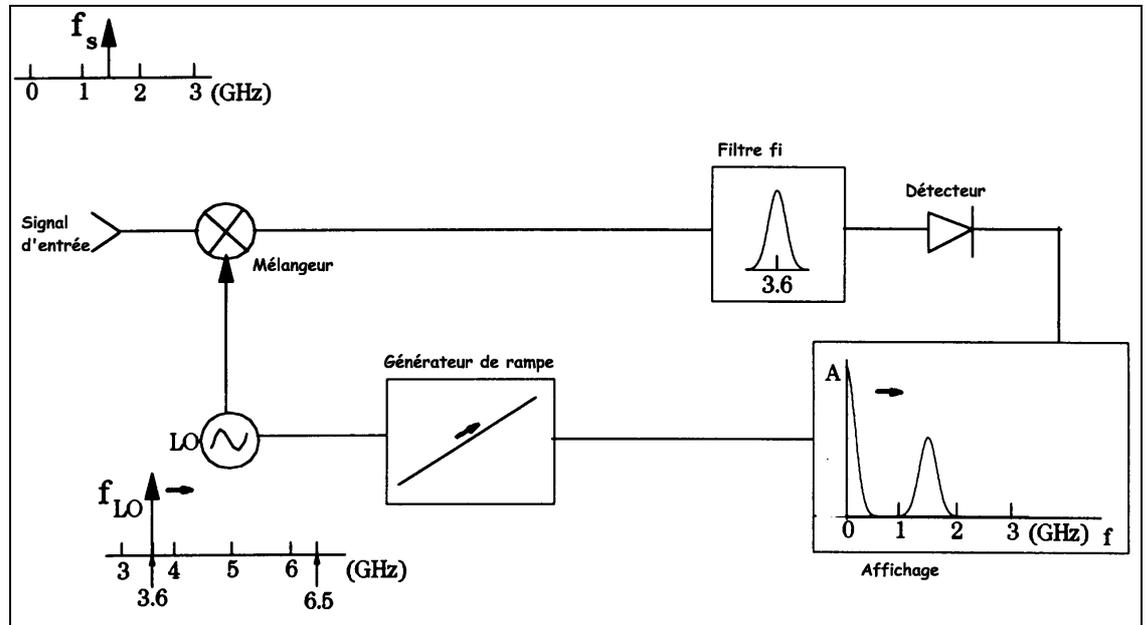
## 10) Fonctionnement du système :

Pour comprendre le fonctionnement de l'analyseur de spectre, prenons un exemple concret.

- gamme 0 à 2,9 GHz
- $f_i = 3,6$  GHz
- oscillateur local de 3,6 à 6,5 GHz

On désire visualiser un signal dont la fréquence est de  $f_s = 1,5$  GHz.

Figure 16.  
Fonctionnement  
de l'analyseur  
de spectre



Grâce à la rampe, l'oscillateur local balaye la gamme 3,6 à 6,5 GHz. Ce signal est mélangé au signal d'entrée et on obtient en sortie du mélangeur les fréquences somme et différence.

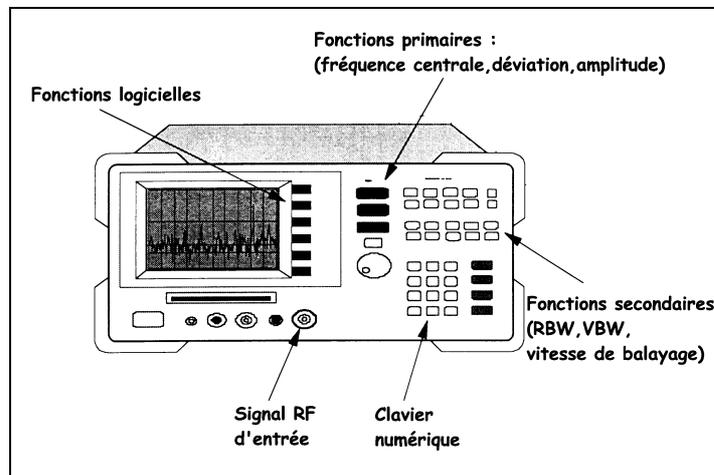
Le signal à la fréquence différence  $f_{io} - f_s$  se déplace lorsque  $f_{io}$  varie et traverse le filtre  $f_i$  lorsque l'oscillateur local passe par la valeur  $f_{io} = 5,1$  GHz.

Les réglages de base d'un analyseur que sont le choix de la **fréquence centrale** et de la **déviaton** (span) agissent sur l'amplitude et la valeur moyenne de la rampe de balayage.

La fréquence de récurrence de la rampe agit sur la **vitesse de balayage** de l'analyseur .

Les réglages secondaires concernent le choix de la **bande passante de résolution (RBW)**, le **réglage de l'atténuateur d'entrée**, et la **bande passante vidéo (VBW)**.

Figure 17.  
Les réglages de  
l'analyseur de  
spectre



## 11) La mesure de fréquence et de niveau :

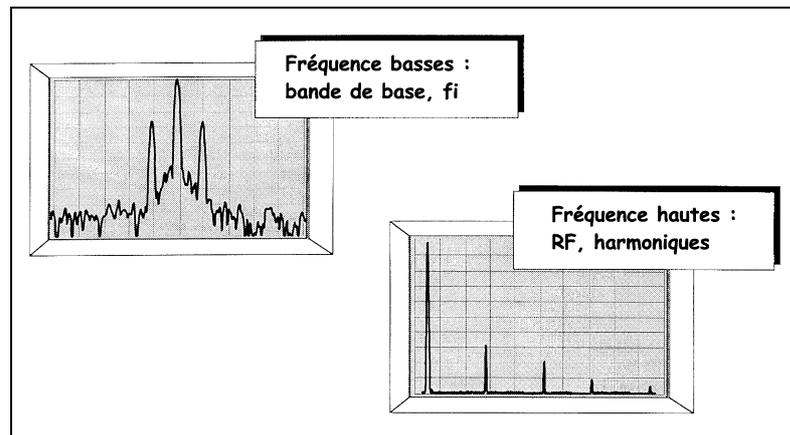
La plage de fréquence est la spécification la plus importante lors de l'acquisition d'un analyseur.

L'analyseur doit bien sûr pouvoir visualiser tous les signaux de la bande utile, mais il ne faut pas oublier les harmoniques éventuels.

Par exemple, pour les communications cellulaires dans la bande des 900 MHz, on peut être amené à mesurer les harmoniques jusqu'au dixième rang, ce qui nous amène à 9 GHz.

En même temps, on veut pouvoir visualiser les spectres *fi* et même les spectres des signaux en bande de base.

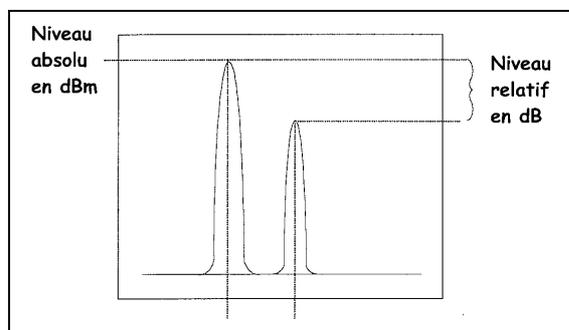
Figure 18.  
Utilisation des  
gammes de  
fréquence



L'erreur dans une mesure de fréquence à l'analyseur de spectre dépend d'un certain nombre de facteurs comme la précision de la référence à quartz, la précision du balayage et la précision sur la fréquence centrale du filtre *fi*

Pour les mesures de niveaux, on distingue la mesure de niveau absolue et relative.

Figure 19.  
Mesure de  
niveau absolue  
et relative



La précision sur la mesure de niveau absolu dépend essentiellement de la précision sur le signal de référence et de l'opération de calibrage.

La précision sur une mesure relative dépend essentiellement de la précision de l'affichage et de la platitude de la courbe de réponse de l'analyseur.

L'amplitude d'une raie affichée sur l'écran peut être affectée par un grand nombre de paramètres comme la précision des amplificateurs, la linéarité du détecteur et la précision de l'atténuateur d'entrée.

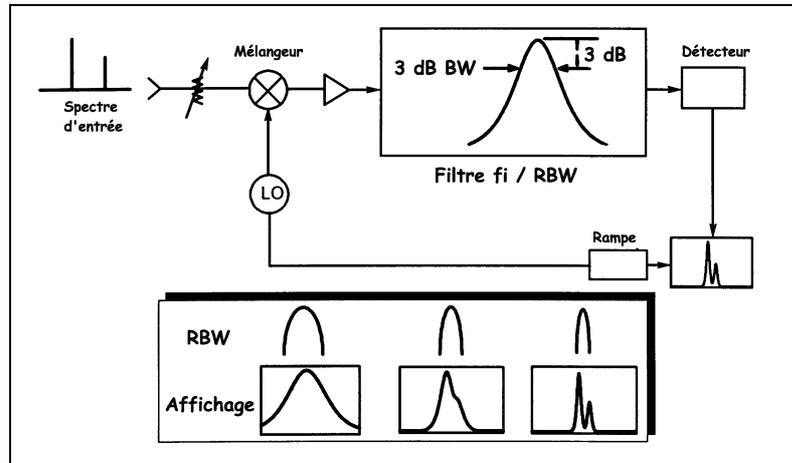
La plupart des analyseurs actuels sont munis d'un dispositif d'autocalibration qui permet de maintenir toutes ces sources d'erreurs à un niveau minimal.

Pour un analyseur de bonne qualité, les fluctuations de la courbe de gain restent dans la fourchette  $\pm 0,5$  dB pour des fréquences inférieures à 1 ou 2 GHz, mais peuvent monter jusqu'à  $\pm 4$  dB pour un analyseur 20 GHz.

## 12) La résolution de l'analyseur :

La résolution d'un analyseur de spectre dépend de la bande passante et du gabarit du filtre  $f_i$ , mais également de modulations de fréquences résiduelles et du bruit de phase de l'oscillateur local.

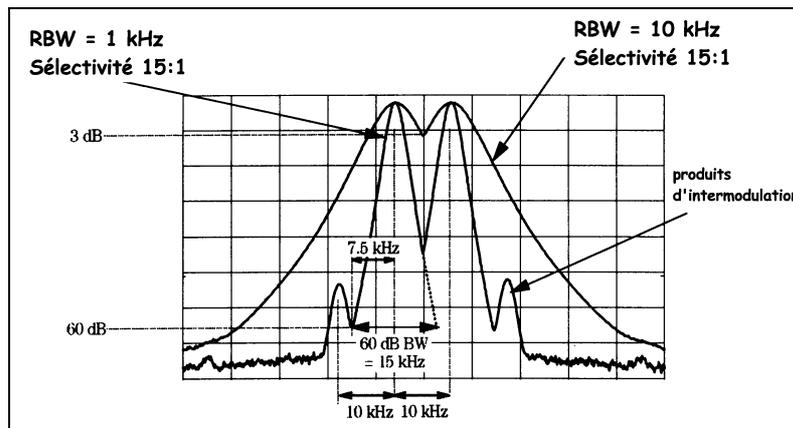
Figure 20.  
Influence de la bande passante du filtre  $f_i$



Il est clair qu'un signal ne peut pas être représenté par une raie infiniment fine. La forme de la raie affichée correspond au gabarit du filtre  $f_i$  et tout changement au niveau de la RBW se traduira par un changement au niveau de l'affichage.

Dans l'exemple suivant, on teste un dispositif en appliquant à l'entrée deux signaux  $f_1$  et  $f_2$  décalés de 10 kHz. On s'intéresse aux produits d'intermodulation éventuels ( de la forme  $nf_1 \pm mf_2$  ) apparaissant en sortie .

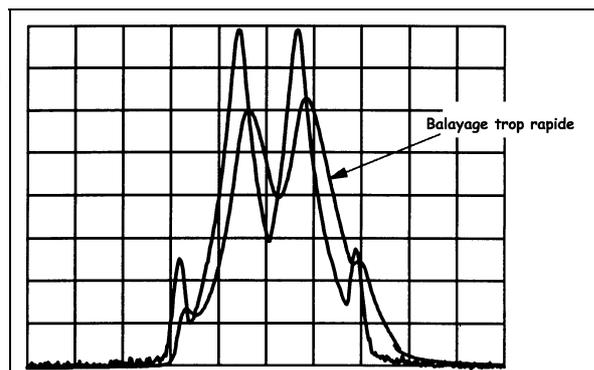
Figure 21.  
Influence de la bande passante du filtre  $f_i$  sur la résolution



La figure ci-dessus montre que la mesure des produits d'intermodulation est possible avec une RBW de 1 kHz et impossible avec une RBW de 10 kHz.

Lorsqu'on choisit un filtre  $f_i$  de faible largeur, il faut prendre en compte la vitesse de balayage. En effet, plus le filtre  $f_i$  est étroit, plus la vitesse de balayage doit être faible si on veut éviter d'introduire une erreur d'amplitude.

Figure 22.  
Déformation du signal visualisé à cause d'un balayage trop rapide



Les analyseurs de spectre actuels sélectionnent automatiquement la vitesse de balayage optimale en fonction de la RBW choisie.

- RBW = 1 kHz                      balayage en 1s
- RBW = 300 Hz                    balayage en 10 s
- RBW = 100 Hz                    balayage en 100 s

### 13) La sensibilité et le niveau de bruit :

L'analyseur de spectre est souvent utilisé pour des mesures de signaux de très faible amplitude. Ces signaux sont affectés de fluctuations aléatoires appelées **bruit**, et l'analyseur rajoute son bruit propre.

Le bruit lié au signal et le bruit propre de l'analyseur se combinent pour donner la ligne de base sur l'affichage appelée **plancher de bruit** ( DANL : displayed average noise level ).

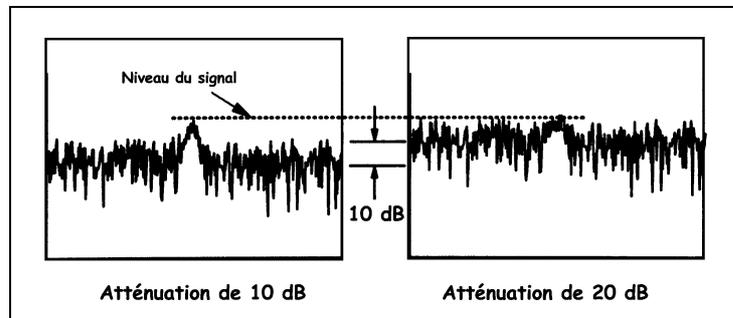
Il sera évidemment impossible de mesurer un signal dont le niveau est inférieur au plancher de bruit. Le niveau du plancher de bruit dépend essentiellement de deux facteurs :

- la position de l'atténuateur d'entrée
- la largeur du filtre fi RBW

Le bruit de l'analyseur de spectre provient essentiellement du premier étage amplificateur fi après le mélangeur. De ce fait l'**atténuateur d'entrée** n'a pas d'action sur le niveau de bruit mais comme il atténue le signal il va dégrader le rapport signal/bruit.

Dans un analyseur de spectre une augmentation de l'atténuation d'entrée est compensée par une augmentation équivalente du gain de l'ampli fi. C'est la raison pour laquelle on n'observe pas de variation de niveau du signal mais simplement une remontée du plancher de bruit.

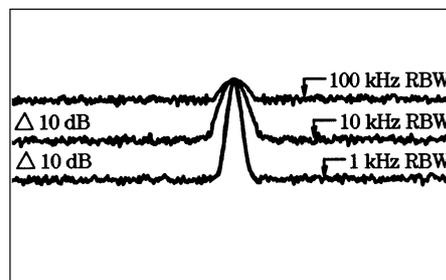
Figure 23.  
Influence de l'atténuation d'entrée sur le plancher de bruit



Le bruit thermique des amplificateurs de l'analyseur est un bruit blanc à large spectre. Ce bruit sera donc filtré par le filtre fi et le niveau de bruit affiché va dépendre de la RBW.

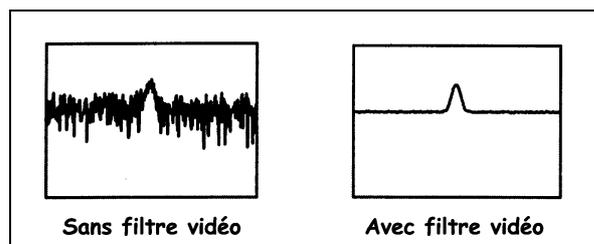
Le plancher de bruit descend de 10 dB chaque fois que la RBW est divisée par 10.

Figure 24.  
Influence de la RBW sur le plancher de bruit



Nous avons vu précédemment que le rôle du filtre vidéo est simplement de lisser le signal affiché. Ce filtre n'a donc pas d'influence sur le plancher de bruit.

Figure 25.  
Influence du filtre vidéo sur le plancher de bruit



Pour une **sensibilité optimale**, on utilisera donc les réglages suivants :

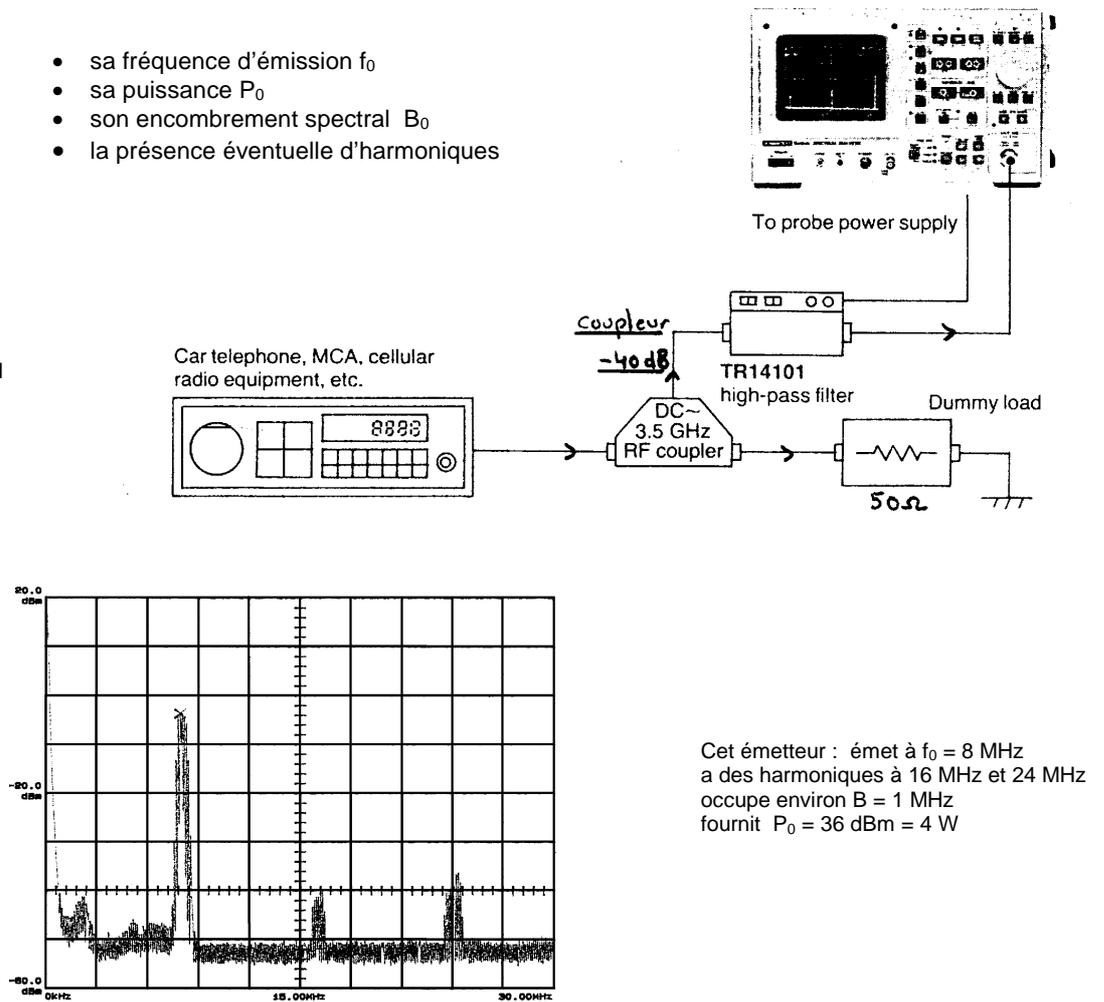
- bande passante fi ( RBW ) la plus faible possible
- atténuation RF d'entrée minimale
- filtrage vidéo efficace ( Vidéo BW < 0,1 à 0,01 RBW )

### 14) Application au contrôle d'un émetteur :

L'analyse spectrale permet de vérifier très aisément un certain nombre de caractéristiques d'un émetteur et en particulier :

- sa fréquence d'émission  $f_0$
- sa puissance  $P_0$
- son encombrement spectral  $B_0$
- la présence éventuelle d'harmoniques

Figure 26. Contrôle du signal émis par un émetteur.



Ces mesures de spectre doivent se faire dans des enceintes ou des pièces parfaitement isolées des rayonnements extérieurs et munies d'un revêtement absorbant les ondes électromagnétiques.

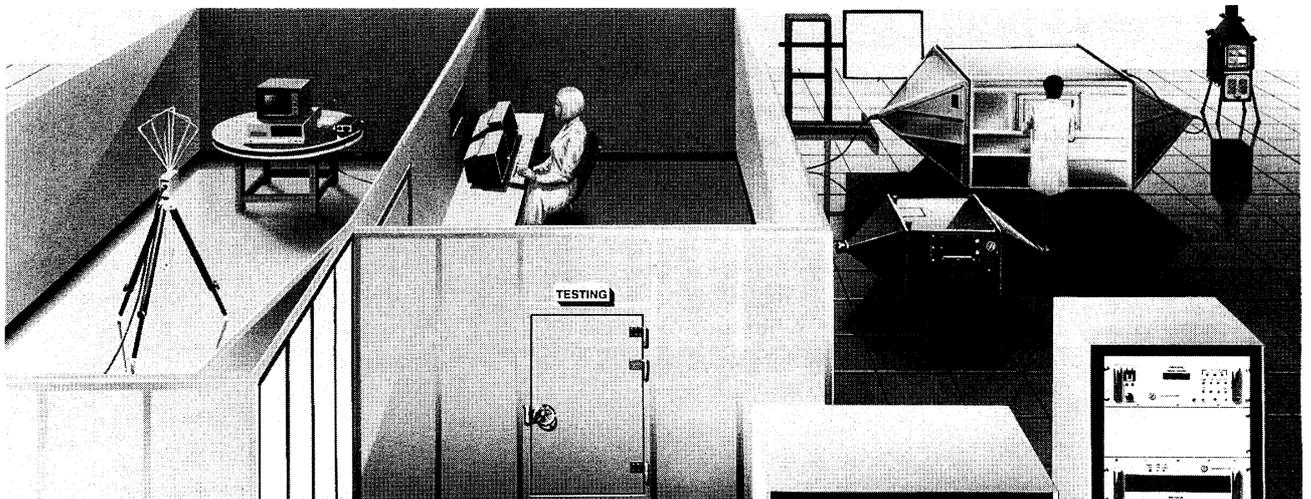


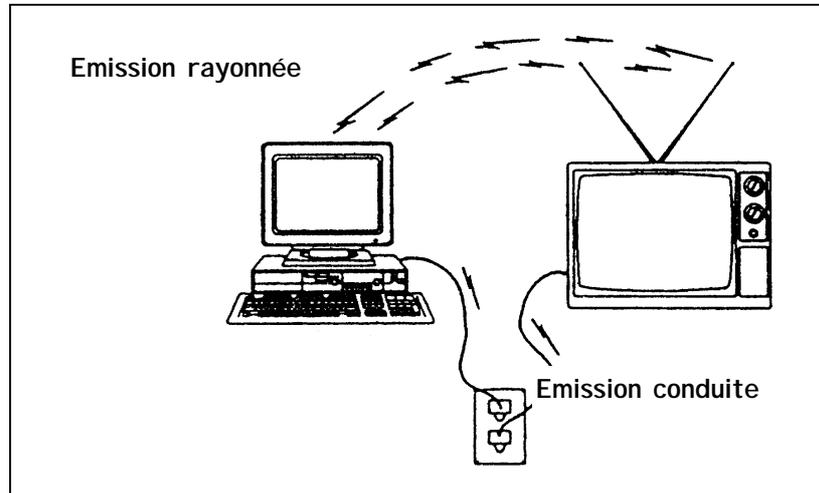
Figure 27. Installation de mesures de rayonnement et CEM.

## 15) Application aux mesures de comptabilité électromagnétique :

Les appareils électriques et électroniques fonctionnent grâce aux courants électriques. Ces courants électriques en général variables produisent des ondes électromagnétiques qui se propagent dans l'espace (rayonnements) ou le long des câbles (conduction).

Ces émissions, quand elles ne sont pas intentionnelles comme dans le cas d'un émetteur par exemple, sont appelées **interférences électromagnétiques (IEM)**.

Figure 28.  
Emission conduite et rayonnée.



Le spectre de ces émissions parasites peut être très large si les courants varient rapidement, ce qui est le cas dans les systèmes numériques comme les micro-ordinateurs par exemple.

On réduit ces émissions par une sélection rigoureuse des composants, une implantation correcte des éléments sur la carte, une répartition optimale des pistes sur le circuit imprimé et une bonne conception du boîtier.

Des normes assez strictes ont été mises en place dans le monde entier pour définir le niveau maximal d'IEM que peut rayonner un appareil de type donné.

Là encore, l'analyseur de spectre muni d'une antenne à large bande est l'outil idéal pour mesurer les IEM émises par un dispositif quelconque.

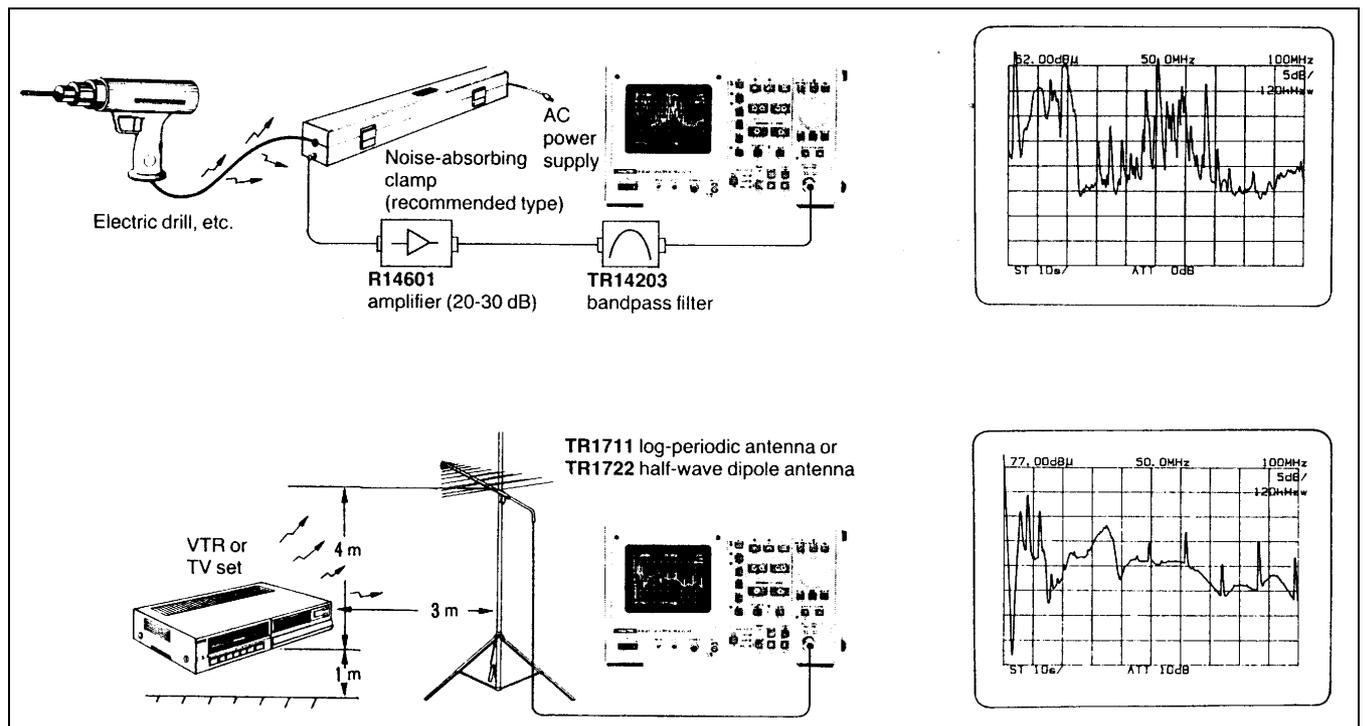


Figure 29. Exemples de mesures de CEM.

## 16) Caractérisation de signaux modulés en AM :

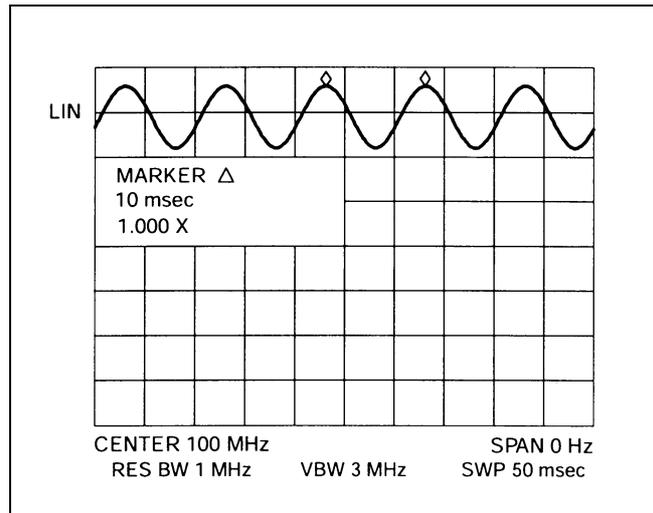
Bien que l'analyseur de spectre soit destiné principalement pour l'observation des signaux dans le domaine fréquentiel, il peut aussi être utilisé pour visualiser la forme temporelle d'un signal.

Cette technique est particulièrement utile pour l'observation de signaux modulés en amplitude.

Dans ce mode de fonctionnement, on choisit une fréquence centrale égale à celle de la porteuse et une excursion en fréquence (Span) nulle.

L'analyseur de spectre fonctionne alors comme un oscilloscope sélectif suivi d'un détecteur crête et affiche le signal modulant.

Figure 30.  
Visualisation en mode zéro-span d'une porteuse modulée en AM par un signal BF de 100 Hz

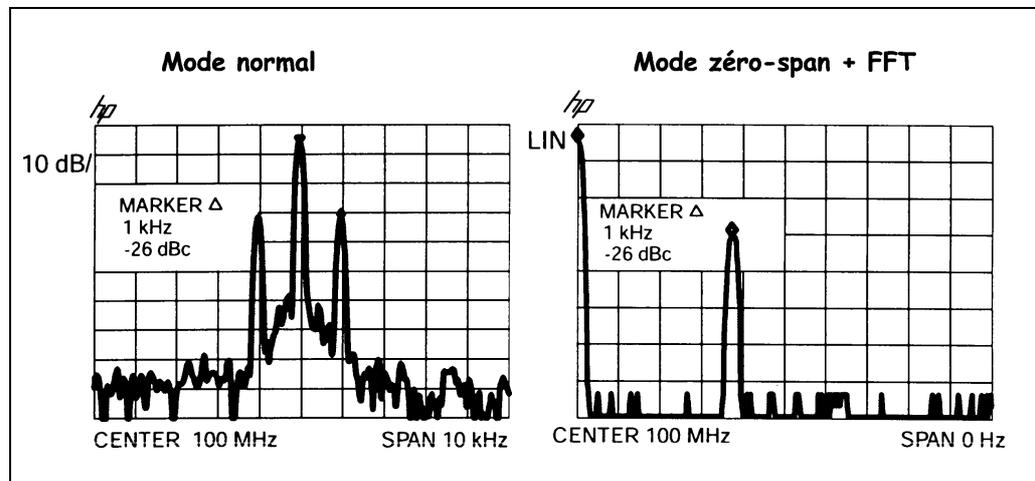


Les analyseurs modernes offrent la fonction FFT qui permet de calculer le spectre du signal sélectionné dans le mode zéro-span précédent.

Pour mesurer l'indice de modulation en AM, on peut donc procéder de deux façons :

- ⇒ fréquence centrale = fréquence de la porteuse  
excursion (span)  $\geq$  bande totale occupée par le signal AM  
RBW  $\ll$  fréquence BF modulante
- ⇒ fréquence centrale = fréquence de la porteuse  
excursion (span) = 0  
RBW  $>$  fréquence BF modulante  
fonction FFT

Figure 31.  
Deux techniques pour évaluer l'indice de modulation en AM

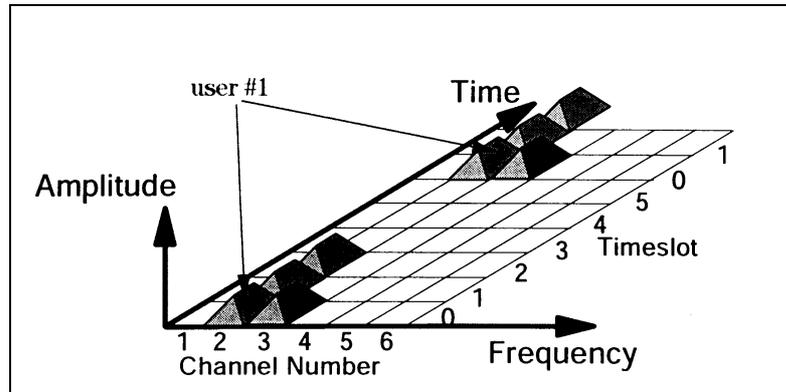


Cette technique est très utile lorsqu'on est en présence de signaux modulés AM+FM.

## 17) Caractérisation de signaux multiplexés TDMA :

Le multiplexage temporel est très utilisé pour les communications numériques puisqu'il permet de placer plusieurs utilisateurs sur la même fréquence.

Figure 32.  
Principe du  
multiplexage  
TDMA

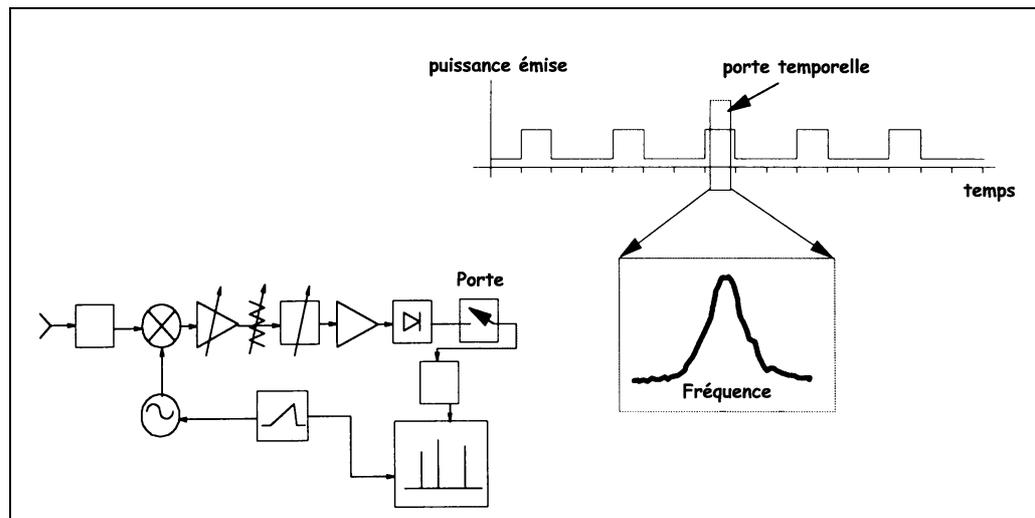


Pour maintenir la qualité du service de communication digitale, il est important de mesurer le signal TDMA dans les deux domaines temporel et fréquentiel.

Le gabarit temporel des salves doit être maîtrisé pour éviter d'éventuels chevauchements et il est nécessaire de connaître le spectre du signal pulsé.

Pour ce genre d'application, il est important de disposer de la fonction de synchronisation temporelle (time-gating) qui permet de s'affranchir du caractère discontinu du signal.

Figure 33.  
Utilisation du  
time-gating pour  
l'observation du  
spectre de  
signaux pulsés



Cette technique permet d'éviter la visualisation d'un spectre déformé par le caractère discontinu du signal modulé et d'en contrôler la modulation comme s'il s'agissait d'un signal continu.

## 18) Visualisation de courbes de réponses :

Pour visualiser la courbe de réponse d'un quadripôle ( amplificateur, filtre ... ) il est nécessaire de disposer d'une source et d'un récepteur.

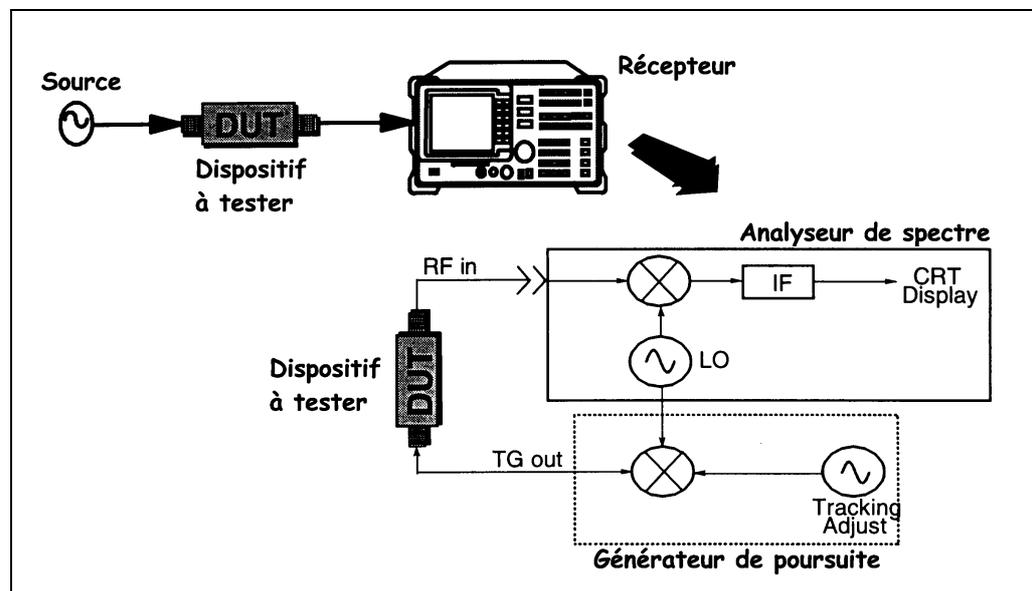
Plusieurs solutions peuvent être envisagées :

- un générateur sinusoïdal et un voltmètre ( ou scope )
- un générateur de poursuite (tracking) et un analyseur de spectre
- un analyseur de réseau scalaire
- un analyseur de réseau vectoriel ( donne aussi le déphasage)

Le générateur de poursuite de l'analyseur de spectre fournit un signal sinusoïdal dont la fréquence est synchronisée avec le balayage de l'analyseur.

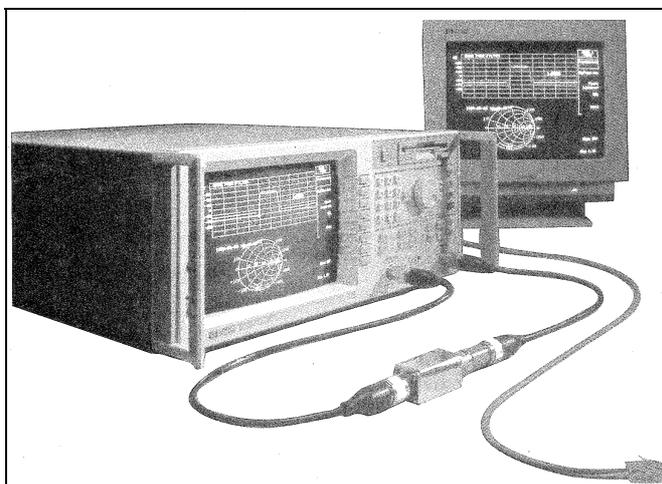
La sortie du générateur de poursuite est appliquée au dispositif à tester et le signal de sortie va sur l'analyseur de spectre.

Figure 34.  
Utilisation du  
générateur de  
poursuite



L'analyseur de réseau scalaire fonctionne sur le même principe que l'analyseur de spectre, mais, parce qu'il est conçu pour la mesure de courbe de réponse, offre un certain nombre d'avantages, en particulier au niveau de l'affichage.

Figure 35.  
Exemple  
d'analyseur de  
réseau scalaire





Merci pour l'intérêt que vous portez à mon travail. J'espère que le cours que vous avez téléchargé répond à votre attente.

Si, malgré le soin qui a été apporté à la rédaction de ce document, vous constatez l'existence d'erreurs, merci de me les signaler par Email à [jean-philippe.muller1@wanadoo.fr](mailto:jean-philippe.muller1@wanadoo.fr)

Comme toute œuvre intellectuelle, ce document est protégé par le Copyright et son usage est réservé à une utilisation personnelle.

### **Techno Assistance Formation**

1, rue du Capitaine Pilleux  
68720 ZILLISHEIM

Site : <http://www.ta-formation.com>