

# RÉALISATION D'UN ANALYSEUR

## DE SPECTRE

Par Alain ARBOUET  
Lycée René Cassin - 64100 Bayonne  
arbouet.alain@wanadoo.fr

-----

### RÉSUMÉ

*Le programme 1995 de physique de PCSI recommande la réalisation d'un analyseur de spectre. Cette manipulation qui vient après 6 TP. cours d'électronique/electrocinétique et 2 TP d'électronique, permet de revoir les notions de générateur modulable en fréquence, multiplieur analogique, filtre sélectif, détection ...(Cf programme).*

*J'ai donc cherché à monter cette manipulation le plus simplement possible ...  
Je me suis fortement inspiré du montage proposé par M. MOREAU dans le BUP n° 675 et d'un montage proposé par M. JONGBLOET dans Electronique Pratique n° 196.*

On trouvera ci-dessous :

- Le texte de la manipulation tel qu'il est proposé aux élèves.
- Des indications concernant la mise en œuvre.
- Des résultats et commentaires comportant entre autres des copies d'écrans correspondant à l'analyse des signaux carrés et triangulaires.
- Le circuit imprimé du montage que j'utilise.

DÉBUT du texte proposé aux élèves

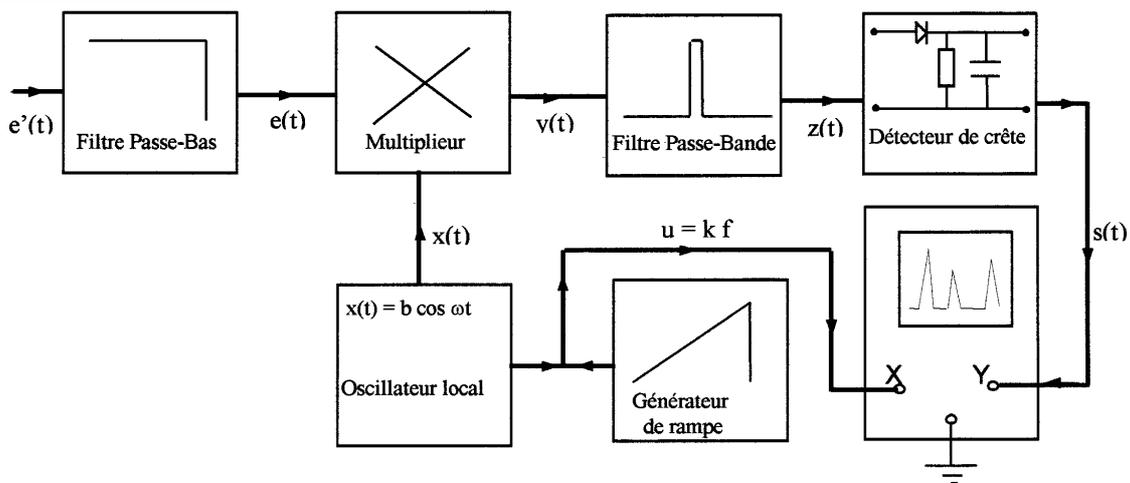
## RÉALISATION D'UN ANALYSEUR DE SPECTRE

### BUT DE LA MANIPULATION

On se propose de réaliser un analyseur de spectre qui permette d'obtenir à l'oscilloscope le spectre des fréquences d'une tension  $e'(t)$  comportant des fréquences inférieures à 80 kHz.

### I- PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT :

#### A) Schéma structurel :



**Le filtre passe-bas** ne doit laisser passer que les fréquences inférieures à 80 kHz, faute de temps il ne sera pas réalisé mais il faudra tenir compte de son absence lors de l'analyse de signaux de fréquences élevées.

**L'oscillateur local** délivre une tension sinusoïdale dont la fréquence est commandée par la tension fournie par le générateur de rampe.

**Le générateur de rampe** délivre une tension en dents de scie, image de la fréquence analysée. Cette tension sera envoyée sur l'entrée X de l'oscilloscope.

**Oscillateur local et générateur de rampe** seront remplacés ici par un **GBF à wobulation interne**, la fréquence  $f$  variera entre 38 kHz et 120 kHz.

**Le multiplieur** réalise l'opération  $y(t) = e(t).x(t)$ .

**Le filtre passe bande** est un filtre très sélectif laissant passer exclusivement que la fréquence  $f_0 = 40$  kHz.

**Le détecteur de crête** va nous donner une tension  $s(t)$  proportionnelle à l'amplitude des raies que contient  $z(t)$ . La tension  $s(t)$  sera envoyée sur l'entrée Y de l'oscilloscope.

. / . .

**B) Fonctionnement :**

Considérons par exemple une tension  $e(t)$  à analyser contenant une composante continue  $a_0$  et deux composantes sinusoïdales de fréquences  $f_1$  et  $f_2$  de pulsations  $\omega_1$  et  $\omega_2$  :

$$e(t) = a_0 + a_1 \cos(\omega_1 t + \varphi_1) + a_2 \cos(\omega_2 t + \varphi_2) \text{ donc}$$

Calculons  $y(t) = e(t).x(t)$ ,  $x(t)$  étant la tension sinusoïdale de fréquence  $f$  délivrée par l'oscillateur local soit :  $x(t) = b \cos \omega t$ .

$$y(t) = a_0 b \cos \omega t + a_1 b \cos(\omega_1 t + \varphi_1) \cdot \cos \omega t + a_2 b \cos(\omega_2 t + \varphi_2) \cdot \cos \omega t =$$

$$y(t) = a_0 b \cos \omega t + 1/2 \{ a_1 b \cos[(\omega_1 + \omega)t + \varphi_1] + a_1 b \cos[(\omega_1 - \omega)t + \varphi_1] \} +$$

$$+ 1/2 \{ a_2 b \cos[(\omega_2 + \omega)t + \varphi_2] + a_2 b \cos[(\omega_2 - \omega)t + \varphi_2] \}$$

$y(t)$  contient donc les fréquences  $f, f_1 + f, |f_1 - f|, f_2 + f$  et  $|f_2 - f|$ .

Supposons par exemple que  $f_1$  soit égal à 10 kHz et  $f_2$  à 20 kHz (cas d'un fondamental et du 1er harmonique..).

Soit  $G$  le gain maximal du filtre sélectif (pour  $f_0$ ). Nous allons établir le tableau des fréquences contenues

dans  $z(t)$  quand  $f$  varie de 40 à 80 kHz (par pas de 10 kHz) en n'oubliant pas la composante continue de  $e(t)$ .

$f_i$ (en kHz)	$f$ (en kHz)	$f_i + f$ (en kHz)	$ f_i - f $ (en kHz)	Amplitude sortie du filtre
0	<b>40</b>	40	40	$G.b.a_0$
10	40	50	30	
20	40	60	20	
0	50	50	50	
10	50	60	<b>40</b>	$G.b.a_1/2$
20	50	70	30	
0	60	60	60	
10	60	70	50	
20	60	80	<b>40</b>	$G.b.a_2/2$

0	70	70	70	
10	70	80	60	
20	70	90	50	
0	80	80	80	
10	80	90	70	
20	80	100	60	
Remarques :				
Si 90	et 50	alors 140	et <b>40</b>	$G.b.a_9/2 + G.b.a_1/2 !!$
Si 100	et 60	alors 160	et <b>40</b>	$G.b.a_{10}/2 + G.b.a_2/2 !!$

$f_0$  étant égale à 40 kHz on constate donc que l'analyse du spectre sera possible si :

1°) La fréquence cherchée ( $f_i$ ) est inférieure à  $f_{imax} = 80 \text{ kHz} = 2.f_0$ .

2°) La fréquence de l'oscillateur local ( $f$ ) est comprise entre  $f_0$  (ici 40 kHz) et  $f_{imax} + f_0$  (ici 120 kHz).

On comprend donc la présence en entrée d'un filtre passe-bas dont la fréquence de coupure est de 80 kHz.

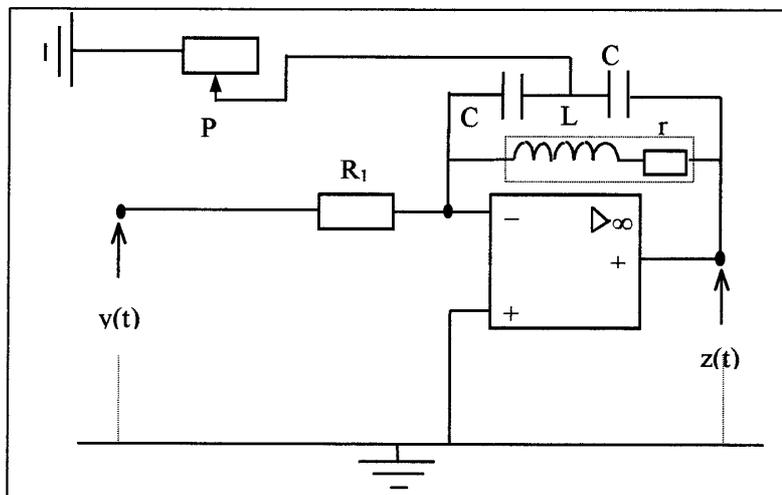
On comprend également pourquoi l'oscillateur local devra délivrer une fréquence variant entre 38 et 120 kHz.

La présence d'une composante continue permet de repérer si besoin la fréquence nulle.

./..

## II. REALISATION DU FILTRE PASSE-BANDE :

### A) Montage :



AO 081

$R_1 = 33 \text{ k}\Omega$

$P = 10 \text{ k}\Omega$

$L, r = \text{bobine moulée} (L = 4,7 \text{ mH}$   
 $r = 66 \Omega)$

$C = 6,8 \text{ nF}$

## B) Manipulation :

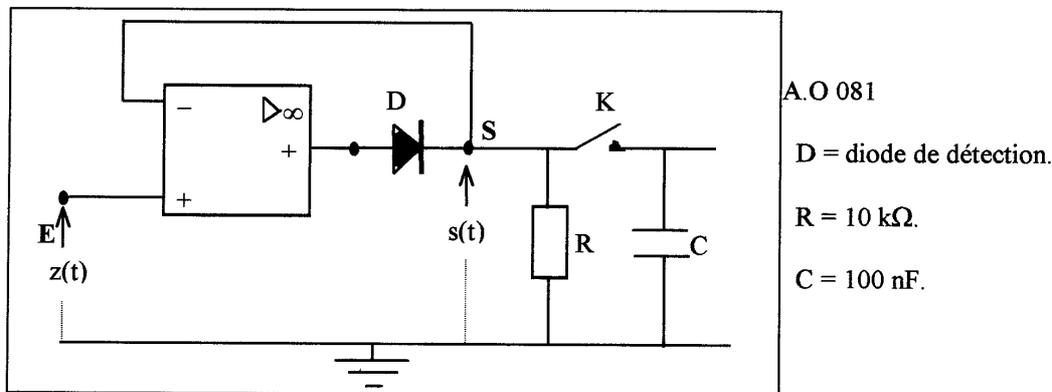
Réaliser le montage sur la platine en plexiglas. Brancher à l'entrée du filtre une tension sinusoïdale ( GBF)

Vérifier à l'oscilloscope ( $y(t)$  en X et  $z(t)$  en Y par exemple) que le filtre est un filtre passe-bande.

Mesurer la fréquence caractéristique  $f_0$ , comparer avec la valeur théorique  $f_0 = 1/(\pi (2LC)^{1/2})$ . Régler P de façon à ce que le gain maximal  $G$  à  $f_0$  soit le plus grand possible (hors saturation !). Mesurer à l'aide de l'oscilloscope gain  $G$  pour cette fréquence (en déduire  $G_{dB}$ ) ainsi que les fréquences de coupures  $f_{c1}$  et  $f_{c2}$  à -3 dB. En déduire le coefficient de qualité du filtre  $Q$ . Visualiser  $z(f)$  à l'oscilloscope en utilisant l'étagé wobulateur du G.B.F. (On balayera en fréquence de 5 à 120 kHz). Conclusion ?

## III- REALISATION DU DETECTEUR DE CRETE :

### A) Montage:



### B) Manipulation :

Démontrer que si K est ouvert,  $s(t) =$  Partie Positive de  $z(t)$  (=PP( $z(t)$ )).

Le dipôle ES est équivalent alors à une diode sans seuil.

Réaliser le montage sur la platine en plexiglas.

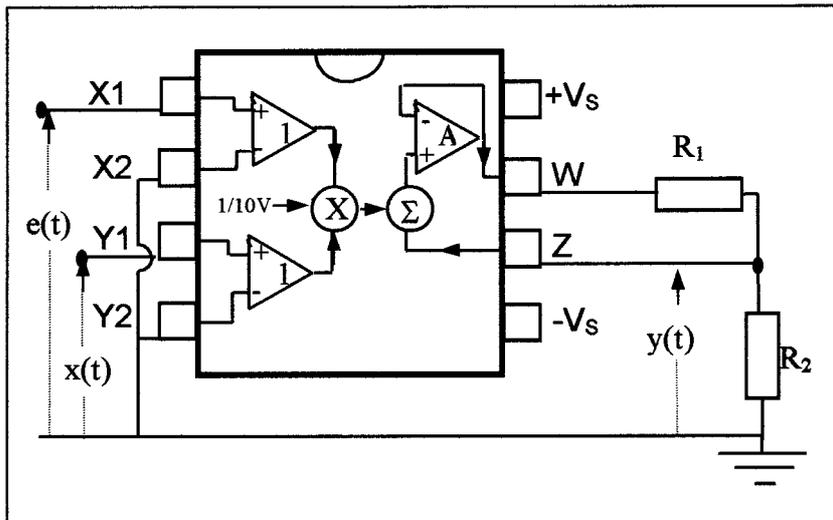
Brancher à l'entrée du détecteur une tension sinusoïdale ( GBF) de fréquence égale à 40 kHz ( $V_E < 3$  V).

Analyser à l'oscilloscope ( $z(t)$  en X et  $s(t)$  en Y par exemple) la tension délivrée en S en l'absence de la cellule de filtrage RC (K ouvert) et en sa présence(K fermé).

Reproduire sur le compte rendu les signaux observés en E et S dans chaque cas. Conclusion? . / .

## IV- FONCTIONNEMENT DU MULTIPLIEUR:

A) Montage : On utilise le multiplieur analogique AD633JN



$$R_1 = 2,2 \text{ k}\Omega.$$

$$R_2 = 22 \text{ k}\Omega.$$

$$V_s = 15 \text{ V}$$

Ce circuit intégré comporte :

- deux entrées différentielles  $X_1$ ,  $X_2$  et  $Y_1$ ,  $Y_2$  à haute impédance ( $10 \text{ M}\Omega$ ),
- une entrée sommatrice  $Z$ ,
- une sortie à faible impédance, protégée pour une durée longue contre les courts-circuits ( $I_{\text{max}} \approx 30 \text{ mA}$ )

(puissance dissipée  $500 \text{ mW}$ ).

La relation générale entrée/sortie est  $W = 0,1[(X_1 - X_2)(Y_1 - Y_2)] + Z$ .

Montrer que compte tenu du montage proposé  $y(t) = e(t).x(t)$ .

### B) Manipulation :

Réaliser le montage . Vérifier que la relation  $y(t) = e(t).x(t)$  est vérifiée (en continu par exemple). Si le temps le permet on pourra utiliser ce composant pour étudier la modulation d'amplitude (Cf Annexe 2).

### V- ANALYSEUR DE SPECTRE :

Les trois modules précédents étant testés, il suffit de les connecter pour satisfaire au schéma structurel vu en I..

Choisir pour  $e(t)$  tout d'abord un signal carré de  $10 \text{ kHz}$  de fréquence, mesurer  $s(t)$  au voltmètre et vérifier

l'existence de pics de tension quand on fait varier manuellement la fréquence de  $x(t)$  de  $38$  à  $120 \text{ kHz}$ .

Visualiser ensuite  $s(f)$  à l'oscilloscope numérique, la tension  $x(t)$  étant alors wobulée soit au coup par coup,

soit lentement soit rapidement.

Reproduire (ou enregistrer ...) l'oscillogramme donnant le spectre du signal carré. Retrouve-t-on les résultats

théoriques ? (pas d'harmoniques pairs et harmoniques impairs qui décroissent en  $1/n$ ).

Recommencer avec la même fréquence mais pour un signal triangulaire. (pas d'harmoniques pairs et

harmoniques impairs qui décroissent en  $1/n^2$ ).

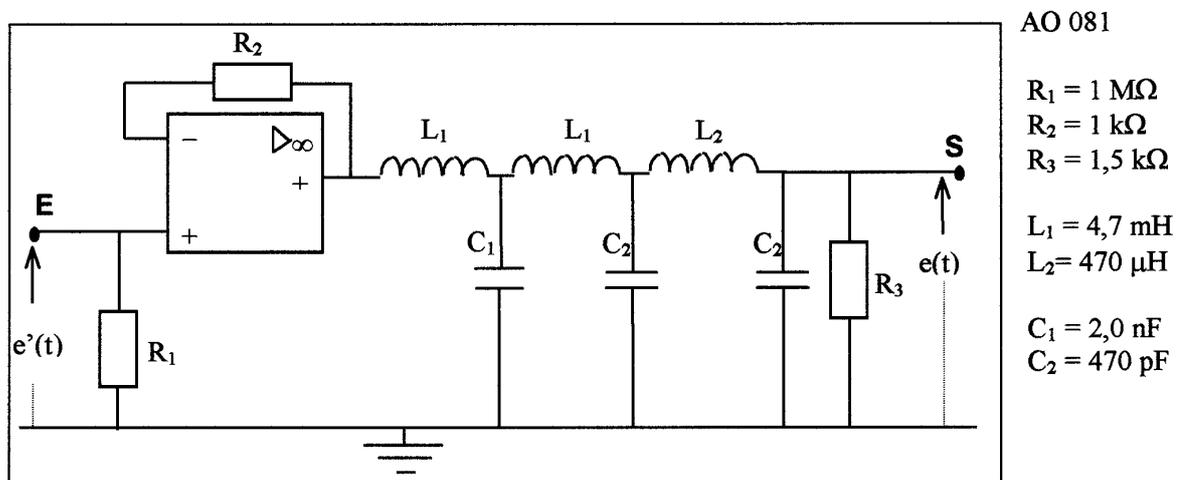
Le spectre obtenu pour un signal carré de  $20 \text{ kHz}$  est-il significatif ? Pourquoi ?

Si le temps le permet on améliorera les performances de l'analyseur de spectre (Cf Annexe ).

./...

## ANNEXE 1: REALISATION DU FILTRE PASSE-BAS :

### A) Montage :



La structure de ce filtre est proche de celle d'un filtre de Butterworth, la fonction de transfert  $H(f)$  étant égale à  $1/[1 + (f/f_c)^{12}]^{1/2}$ . Il présente un gain maximal de 1 et une très forte atténuation en haute fréquence.

### B) Manipulation :

Réaliser le montage sur la platine en plexiglas. Brancher à l'entrée du filtre une tension sinusoïdale ( GBF)

Vérifier à l'oscilloscope ( $e(t)$  en X et  $e'(t)$  en Y par exemple) que le filtre est un filtre passe-bas. Mesurer la fréquence de coupure  $f_c$  du filtre à - 3 dB.

Visualiser  $e(f)$  à l'oscilloscope en utilisant l'étage wobulateur du G.B.F. (On balayera en fréquence

de 5 à 120 kHz). Conclusion ?

Intercaler ce filtre entre générateur et multiplicateur (Cf I) et reprendre l'analyse spectrale d'un signal carré de 20 kHz. Conclusion ?

*FIN du texte proposé aux élèves*

## **RÉALISATION PRATIQUE :**

Le T.P. dure 4 heures, les composants passifs et actifs sont proposés à chaque binôme en vrac, ils sont enfichables sur une plaque de plexiglas de 58 cm x 25 cm.

Cette plaque comporte 160 douilles au pas de 4 cm.

Le montage complet nécessite 18 dipôles, 1 potentiomètre, 3 A.O. un multiplieur et 7 straps.

Les A.O. (AO 081) et le multiplieur(AD633JN) sont également montés sur des supports enfichables et alimentés via des douilles qui sont sur ces supports.

Chaque binôme dispose en plus d'un GBF wobulable, d'un générateur de signaux (ordinaire), d'une alimentation +15V/-15V, d'un oscilloscope et d'un multimètre.

Les élèves réalisent le montage pas à pas, testent chaque module et ensuite relient ces modules par des cavaliers pour l'analyse spectrale finale.

Le filtre passe-bas n'est réalisé qu'après coup, si le temps le permet.

En fait en quatre ans peu d'élèves ont testé le passe-bas que je propose donc en annexe.

Je dispose d'un montage réalisé sur circuit imprimé correspondant à celui que réalisent les élèves et muni d'interrupteurs entre chaque module. Ils peuvent donc comparer à chaque étape leurs résultats et les miens (visualisé à l'ordinateur via un oscillo METRIX 8020 et le kit d'acquisition REGRESSI-METRIX DE MICRELEC). Ce montage me permet aussi de montrer en fin de séance aux élèves lents l'utilité du filtre passe-bas. Un traitement très facile à faire sous REGRESSI-WIN permet de graduer l'axe des abscisses en fréquence (fréquence de balayage ou fréquence des harmoniques) vu que la fréquence est proportionnelle au temps (en mode de balayage linéaire évidemment).

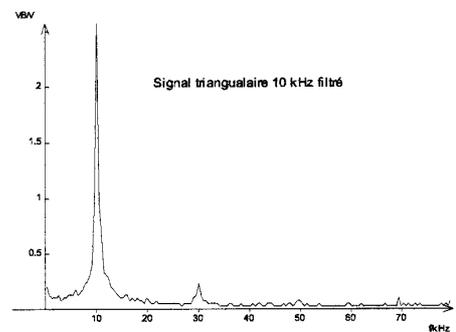
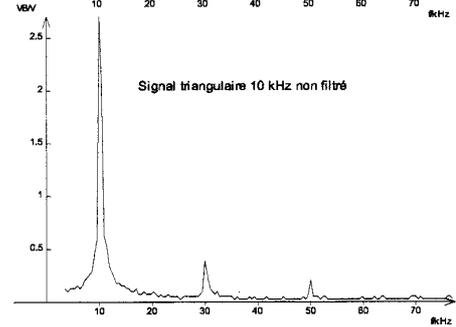
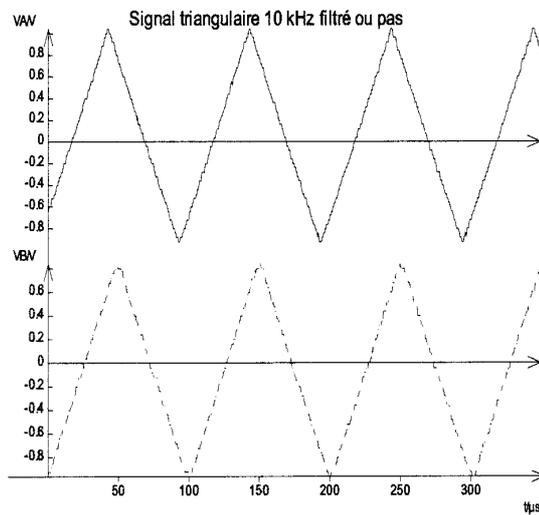
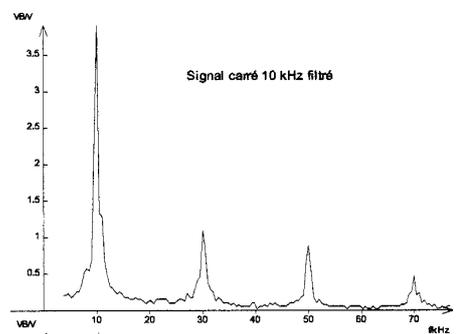
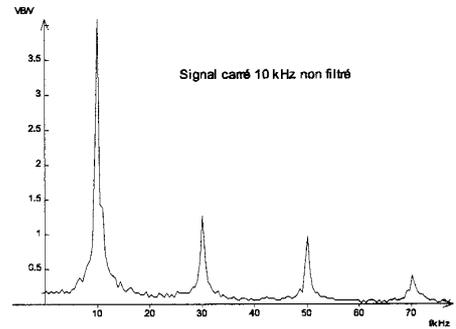
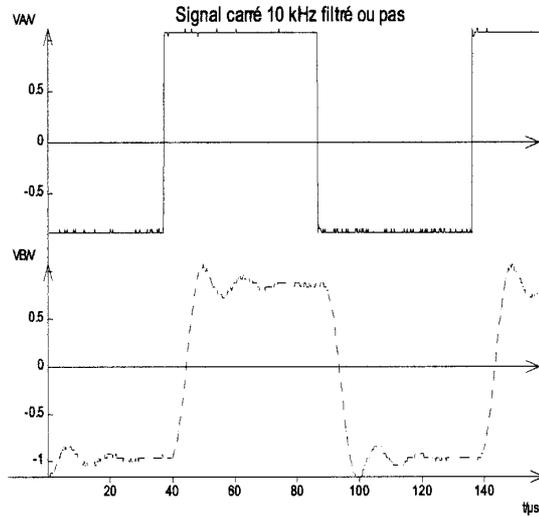
## **RESULTATS ET COMMENTAIRES :**

### **A. Aspect qualitatif :**

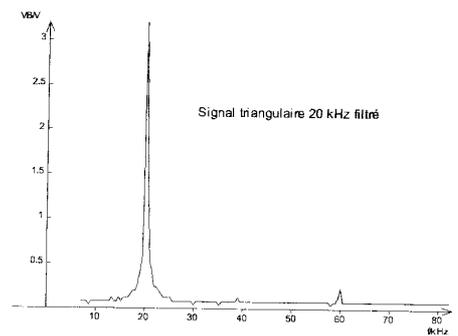
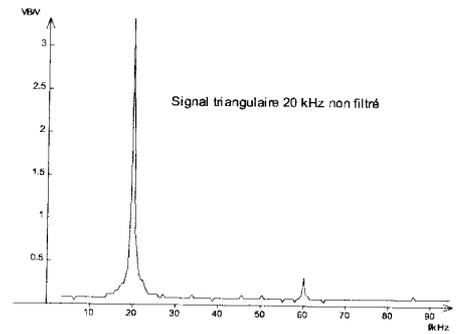
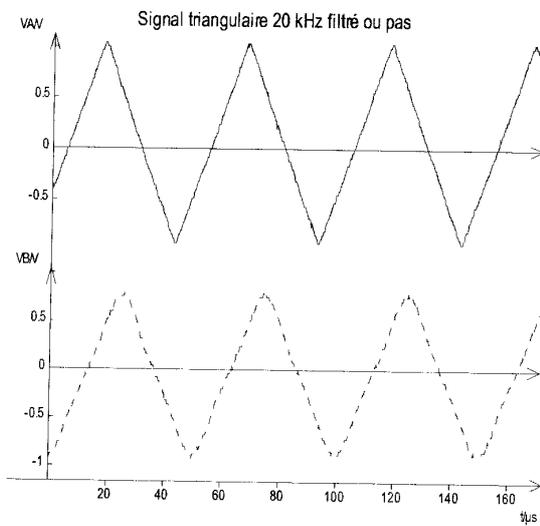
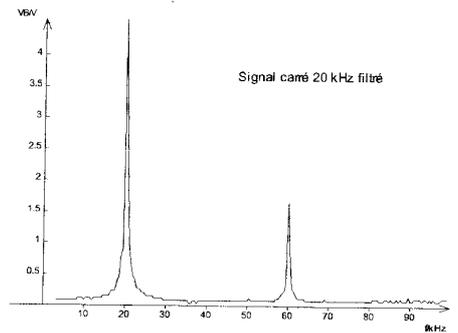
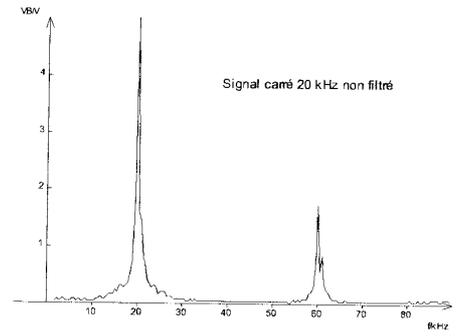
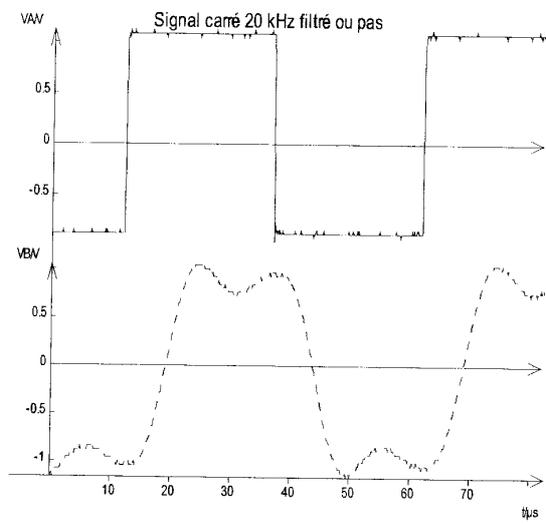
Les reproductions des signaux et des analyses spectrales sont très faciles à réaliser et prouvent l'existence des divers harmoniques. L'importance du filtrage est plus difficile à prouver car l'amplitude des raies reproduites varie selon la vitesse de balayage, l'existence de bruit de fond et la précision de l'interface.

On peut très facilement repérer la fréquence nulle en agissant sur le décalage (offset) du générateur de fonction délivrant le signal à analyser. Une raie supplémentaire vient alors s'ajouter au début du spectre, confirmant les prévisions théoriques.

## Analyse de signaux carrés et triangulaires de fréquence = 10 KHz :



## Analyse de signaux carrés et triangulaires de fréquence = 20 KHz :



B. Aspect quantitatif :

Pour pouvoir exploiter les mesures il faut les faire "à la main" : soit sur l'oscilloscope lui-

même en balayage rapide en utilisant les curseurs numériques soit au multimètre en balayant très lentement

(10 s) **autour de chaque pic** et en utilisant le mode surveillance avec affichage du maximum. (multimètre moderne...). Les mesures ci-dessous ont été faites dans ces conditions pour des signaux d'amplitude 2 V crête à crête le potentiomètre P du filtre passe-bande ayant une valeur de 9 kΩ environ.

Signal analysé			Harmoniques				Total mesuré (*)	Total théorique
			Fréquence :					
Nature	Filtré ?	Fréquence	10 kHz	20 kHz	30 kHz	70 kHz	4 harm (2 harm)	4 harm (2 harm)  environ...
			Amplitude :					
			A1 (mV)	A2 (mV)	A3 (mV)	A4 (mV)		
Carré	non	10 kHz	4110	1434	841	670	4,21(2,05)	4(2)
Carré	oui	10 kHz	3933	1303	761	610	4,05(1,99)	4(2)
Triangle	non	10 kHz	2727	280	53	8,9	2,57(1,92)	4(2)
Triangle	oui	10 kHz	2605	249	42	3,7	2,33(1,86)	4(2)

Signal			Harmoniques		Total mesuré (*)	Total théorique
			Fréquence :			
Nature	Filtré ?	Fréquence	20 kHz	60 kHz	2 harm	2 harm environ...
			Amplitude :			
			A1 (mV)	A2 (mV)		
Carré	non	20 kHz	4073	1386	2,02	2
Carré	oui	20 kHz	3821	1333	2,05	2
Triangle	non	20 kHz	2697	254	1,85	2
Triangle	oui	20 kHz	2524	240	1,86	2

(\*) : Total mesuré =  $1 + 3A2/A1 + 5A3/A1 + 7A4/A1$  pour le signal carré

Total mesuré =  $1 + 9A2/A1 + 25A3/A1 + 49A4/A1$  pour le signal triangulaire

Les résultats sont bons :

a) Le filtrage joue un rôle mais il n'est pas primordial...d'où l'étude du P.B. en annexe :

- pour les signaux de 10 kHz, le fondamental est "pollué" par le 90 kHz ( $40 = 50 - 10 = 90 - 50$ )

et le 1<sup>er</sup> harmonique par le 110 kHz ( $40 = 70 - 30 = 110 - 70$  ;  
- pour les signaux de 20 kHz, le fondamental est "pollué" par le 100 kHz ( $40 = 60 - 20 = 100 - 60$ )  
et le 1<sup>er</sup> harmonique par le 140 kHz ( $40 = 100 - 60 = 140 - 100$ );

b) La décomposition mathématique est vérifiée dans les deux cas pour le signal carré par contre lorsque l'on tient compte des 4 harmoniques dans le cas du signal triangulaire les résultats sont mauvais mais ceci est tout à fait logique compte tenu de la très faible amplitude des harmoniques 5 et 7  
et donc de l'importance de l'incertitude de mesure à ce niveau là (bruit de fond en particulier)...

## **CONCLUSION**

Cette manip est très intéressante : elle permet de réviser pas mal de chapitres du cours, elle permet aux élèves de comprendre beaucoup mieux la décomposition d'un signal en série de Fourier elle nécessite en plus peut de matériel dans la mesure où l'oscillateur local n'est pas réalisé...

## **REMERCIEMENTS**

Je voudrais encore remercier ici le "technicien maison" Alain BONIOL qui a réalisé le circuit imprimé et les agents du laboratoire de sciences physiques du lycée René Cassin qui ont réalisé les plaques et les dipôles pour que la manip puisse être réalisée par neuf binômes.

**Circuit imprimé :**

