

Régime sinusoïdal forcé

L'objectif de ce TP est d'étudier divers aspect du régime sinusoïdal : l'impédance d'une bobine dans une première partie et le filtrage dans une seconde. À l'occasion de cette deuxième partie, le TP introduit l'analyse spectrale.

Ce TP s'appuie sur le travail effectué lors du chapitre §ELCT6 Filtres.

Les relations notées (*) sont celles qu'il faut savoir retrouver et les heures mentionnées sont données à titre purement indicatif de façon à permettre l'évaluation de l'importance relative des différentes parties.

Préliminaires à faire avant le TP

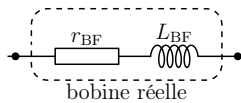
- Commencez par préparer la première partie sur l'impédance de la bobine.
- Lisez ensuite la partie II) page 3 expliquant comment étudier un filtre en TP.
- Choisissez les deux filtres que vous étudierez pendant le TP : un filtre passif et un filtre actif.
- À l'aide du comportement asymptotique, déterminez leurs natures (passe-bas, passe-haut, passe-bande ou réjecteur) et assurez-vous qu'ils n'aient pas la même.
- Déterminez la fonction de transfert $T(\omega) = \frac{U_s}{U_e}$ des deux filtres.
- Déterminez les valeurs numériques des grandeurs caractéristiques associées (fréquence centrale, fréquence(s) de coupure) pour ces deux filtres. *On ne demande pas l'expression analytique de ces fréquences, juste leurs valeurs.*

I) Impédance d'une bobine

1°) Deux modèles

i. En basses fréquences (BF)

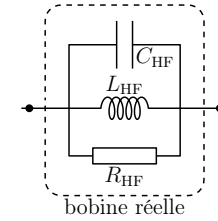
En BF une bobine réelle est électriquement équivalente à une bobine idéale en série avec une résistance.



- Comment s'écrit l'impédance de la bobine ?
- La courbe $Z_L^2 = f(\omega^2)$ est une droite. Exprimer la pente et l'ordonnée à l'origine en fonction de L_{BH} et r_{BF} .

ii. En hautes fréquences (HF)

En HF une bobine est équivalente à un circuit R, L, C parallèle (appelé aussi circuit bouchon) dont les valeurs des composants valent L_{HF} , C_{HF} et R_{HF} .



- Il est tout à fait raisonnable de considérer que $L_{HF} = L_{BF} \stackrel{\text{not}}{=} L$ mais, en revanche, $r_{BF} \neq R_{HF}$.
- Cherchez, pour ce dipôle, sa pulsation propre ω_0 et son facteur de qualité Q définis par l'expression de son module :

$$Z_{AB} = \frac{Z_0}{1 + jQ \left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega} \right)}$$

- Cherchez l'expression de l'impédance maximale en module en fonction de Z_0 , ω_0 et Q puis en fonction de R_{HF} , L_{HF} et C_{HF} ensuite.

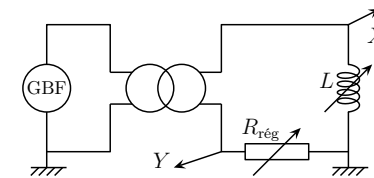
2°) Impédance d'une bobine réelle

i. montage

- Réalisez le montage ci-dessous. Le GBF doit fournir un signal sinusoïdal de valeur moyenne nulle d'amplitude d'environ 2,0 V. $R_{\text{rég}} = 1,0 \text{ k}\Omega$ et $L = 0,4 \text{ H}$.



N'utilisez pas de fil coaxial pour la voie X et n'oubliez pas d'afficher -Y au lieu de Y.



ii. exploitation en BF

- Pour environ 7 à 10 fréquences différentes (de environ 1 Hz à environ 1 kHz), relevez les amplitudes de Y et de X (et la fréquence bien sûr!).

f								
X								
Y								

- Déduisez-en le module de l'impédance de la bobine (cf annexe A page 8).
- À l'aide d'une régression linéaire du type $Z^2 = a\omega^2 + b$, déterminez les valeurs de L et de r_{BF} et comparez cette dernière à la mesure de la résistance de la bobine à l'ohmmètre (sans oublier de la débrancher du circuit).

→ S'il n'y a pas de différence notable entre les deux valeurs de la résistance de la bobine, vous avez beaucoup de chance. Sinon, expliquez pourquoi un tel écart n'est pas surprenant.

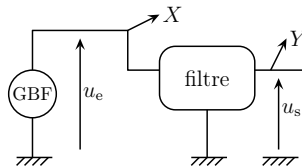
iii. exploitation en HF

- Pour 7 à 8 fréquences (de 500 Hz à environ 1,0 MHz) déterminez le module et l'argument de l'impédance complexe de la bobine.
- Pourquoi, en basses fréquences, est-il si difficile de mesurer l'amplitude de la tension aux bornes de la bobine ?
- En faisant varier la fréquence et en observant les voies X et Y à l'oscilloscope, déterminez la fréquence où l'**impédance** de la bobine admet un maximum : c'est la fréquence propre de la bobine (en général entre 10 et 40 kHz).
- De la mesure précédente, déduisez-en la valeur de C_{HF} .
- Quelle est l'origine physique de l'aspect capacitif d'une bobine en HF ?
- Que devient r_{BF} dans le modèle HF ?
- Pourquoi ne faut-il pas utiliser de câble coaxial pour la voie X dans le montage précédent ?

II) Étude d'un filtre

1°) Montage

- Réalisez le montage ci-dessous avec une tension d'entrée (\sin ; f ; 5,0 V) sans oublier d'alimenter l'AO au cas où ...



Alors $T(\omega) = \frac{U_s}{U_e}$ n'est autre que le rapport de l'amplitude de la voie Y par l'amplitude de la voie X et $\varphi(\omega) = \arg[T(\omega)]$ est le déphasage de Y par rapport à X.

2°) Fonction de transfert

i. premier passage

- Vérifiez tout d'abord en modifiant très largement la fréquence du GBF que le filtre possède bien la nature attendue.
- Faites un premier relevé de points régulièrement espacés en échelle semi-logarithmique :
 - 1 Hz, 3 Hz, 10 Hz, 30 Hz, 100 Hz, ... pour avoir deux points par décade ;
 - 1 Hz, 2 Hz, 5 Hz, 10 Hz, 20 Hz, 50 Hz, 100 Hz, ... pour avoir 3 points par décade¹.
- Pour chaque point, déterminez $T(\omega)$ puis $G_{dB}(\omega) = 20 \log T(\omega)$.
- Une fois le relevé terminé, tracez les courbes $T(\omega)$ et $G_{dB}(\omega)$ sur du papier semi-logarithmique avec une échelle verticale simple mais permettant néanmoins d'occuper le maximum de place.

¹Il peut être judicieux, pour éviter bon nombre de réglages et ainsi gagner beaucoup de temps, de faire les mesures dans l'ordre suivant : 1 Hz, 10 Hz, 100 Hz, ..., 2 Hz, 20 Hz, 200 Hz, ..., 5 Hz, 50 Hz, ... et de **ne pas s'acharner** sur des mesures visiblement délicates.

ii. deuxième passage

- Refaites quelques mesures (une — deux maximum — de chaque « côté ») autour des fréquences particulières (fréquence centrale, fréquence de coupure, ...) en choisissant les valeurs adéquates à l'aide du graphique réalisé.
- Déterminez **très rapidement** les fréquences particulières (fréquence de coupure, fréquence centrale, ...).
- Estimez **encore plus rapidement** l'incertitude sur les valeurs des fréquences particulières.

iii. comparaison

- Comparez les valeurs graphiques avec les valeurs obtenues dans les préliminaires.
- Expliquez les éventuels désaccord.

3°) Réponse à un signal triangulaire

i. affichage d'un spectre

- Pour faire afficher le spectre d'une des deux voies, utilisez le bouton **MATH** et choisissez « FFT » dans le choix du calcul à effectuer. N'oubliez pas de vérifier que la voie pour laquelle vous demandez la FFT est celle désirée.

Il y a deux règles pour afficher un beau spectre. Comme le spectre calculé est celui du signal *affiché* et non celui du signal *reçu*, un mauvais affichage peut complètement détériorer la lisibilité d'un spectre. D'où la règle :



Afficher une dizaine de périodes du signal à analyser et sans le faire dépasser de l'écran permet d'avoir un spectre correct.

Normalement avec cette première règle, tout devrait bien se passer dans la plupart des cas. Toutefois il existe un phénomène appelé « repliement de spectre » : quand les pics correspondent à des fréquences trop élevées, au lieu de ne pas être affichées sur l'écran, tout se passe comme si elles se « repliaient » et apparaissent ainsi à des endroits étranges.



Changer la base de temps permet de contracter le spectre pour éviter qu'il dépasse de l'écran à droite et qu'il se replie.

N'oubliez pas que, du fait de la technologie, il y a une grande différence entre le spectre attendu (sous forme de « pics ») et celui affiché, il est donc important **d'avoir une idée du spectre qui doit s'afficher avant de l'afficher**. Pour ceux qui veulent en savoir plus sur le calcul de ce spectre, ils peuvent consulter l'annexe B.

ii. réglage de l'affichage d'un spectre

Les différents boutons du menu FFT correspondent à :

- **OPERAND** : voie dont l'oscilloscope affiche le spectre ;
- **UNITS/DIV** : réglage de la sensibilité verticale (dilatations des pics) ;
- **REF LEVEL** : réglage du niveau de référence du spectre (déplacement vertical du spectre) ;
- **FFT MENU** :
 - **FREQ SPAN** : intervalle de fréquences affichées (toujours à régler au maximum) ;
 - **CENTR FREQ** : fréquence au centre de l'écran ;
 - **MOVE 0 TO LEFT** : place la fréquence 0 à gauche de l'écran ;

- **WINDOW** : change la fenêtre (cf. ii.);
- **AUTOSCALE FFT** : à utiliser au début des réglages.
- Lors de la première manipulation du spectre, faites le spectre d'un signal triangulaire et n'hésitez pas à appeler le professeur et à essayer quelques boutons, « pour voir ».
- Une fois le spectre d'un signal triangulaire affiché, augmentez la fréquence de manière à observer un repliement de spectre.

iii. pour l'étude d'un filtre

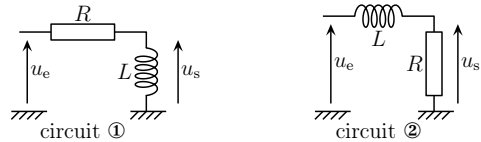
- Réglez u_e (triang; f ; 2,0 V) et observez u_s où $f \simeq \frac{f_c}{11}$. S'il existe plusieurs fréquences de coupure (filtres passe-bande ou réjecteur), choisir la plus basse des 2.
- Imprimez les spectres de $u_e(t)$ et $u_s(t)$ avec la même échelle.

III) Filtres à étudier

1°) Filtres passif ☹

i. Circuits R, L

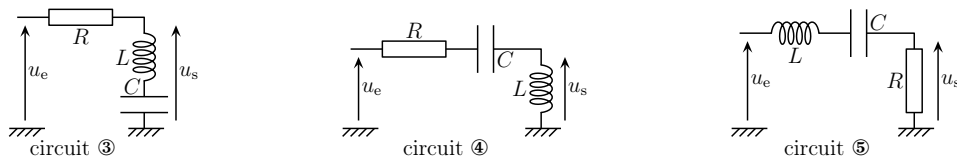
- Utilisez les valeurs suivantes : $R = 1,0 \text{ k}\Omega$ et $L = 0,2 \text{ H}$.



ii. Circuits R, L, C

Ces filtres ont été étudiés en cours §ELCT6-III.

- Utilisez les valeurs suivantes : $R = 1,0 \text{ k}\Omega$ et $C = 1,3 \cdot 10^{-7} \text{ F}$; $L = 2,0 \cdot 10^{-1} \text{ H}$.



iii. Résultats

- Consignez les résultats dans un tableau du type suivant.

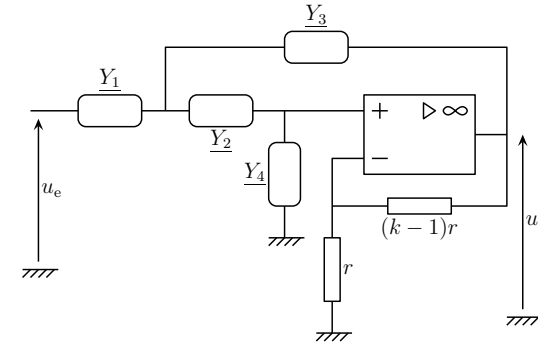
f (Hz)							
X							
Y							
T							
G_{dB}							

- Indiquez précisément les fréquences de coupure mesurées et comparez-les aux fréquences attendues.
- N'oubliez pas les deux impressions de spectre : une pour l'entrée une pour la sortie.

2°) Filtres actifs ☹

i. Structure de SALLEN ET KEY

Le montage général est représenté ci-dessous.



Ces filtres ont été étudiés dans l'exercice ELCT6-10.

- Utilisez un AO TL081 et les valeurs suivantes :

$R = 1,0 \text{ k}\Omega$; $C = 1,6 \cdot 10^{-7} \text{ F}$; $r = 10 \text{ k}\Omega$.

Lors de l'étude, assurez-vous toujours visuellement que la tension de sortie de l'AO n'est pas saturée.

dipôle	1	2	3	4	k
circuit ⑥	R	R	C	C	1,56
circuit ⑦	C	C	R	R	1,56
circuit ⑧	R	C	R	R//C	2

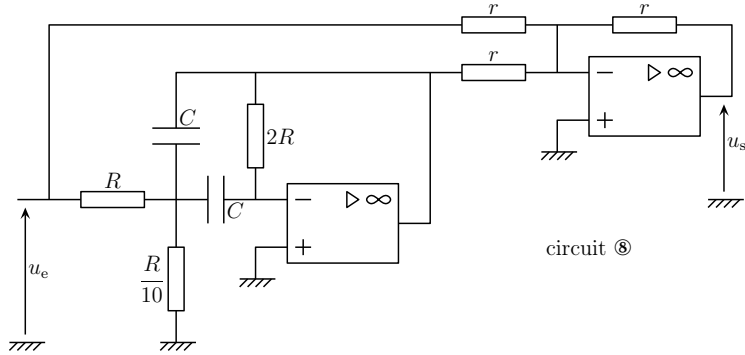
N.B. : les valeurs de R et C ne sont pas critiques; vous pouvez en changer suivant la disponibilité à condition de :

- de changer pour des valeurs proches ($1,6 \cdot 10^{-7} \text{ F}$ peut devenir $1,0 \cdot 10^{-7} \text{ F}$ ou $2,2 \cdot 10^{-7} \text{ F}$);
- de changer **tous** les composants correspondants à R ou C .

ii. Structure de RAUCH

Ce filtre a été étudié dans l'exercice ELCT6-9.

- Utilisez deux AO TL081 et les valeurs suivantes : $R = 10 \text{ k}\Omega$; $C = 1,6 \cdot 10^{-8} \text{ F}$; $r = 10 \text{ k}\Omega$.



iii. Résultats

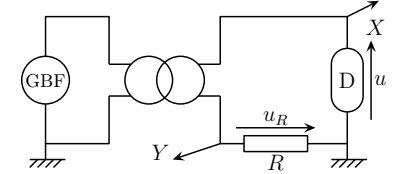
→ Faites comme pour le filtre passif.

Annexes

A Annexe : détermination d'une impédance complexe

1° Montage

Pour étudier l'impédance d'un dipôle à l'aide de l'oscilloscope, on utilise le montage ci-dessus utilisant un transformateur d'isolement (cf. TP-Cours ELCT2 GBF et oscilloscope) et on affiche $-Y$ et non Y .



2° Détermination du module

Dans les conditions précédentes (surtout l'affichage de $-Y$), nous avons les relations :

$$Z = R \frac{U}{U_R} \quad \text{et} \quad \varphi = \arg(Z) = \arg\left(\frac{U}{U_R}\right) \quad (*)$$

Ainsi le rapport $\frac{Z}{R}$ n'est autre que le rapport de l'amplitude de la voie X par l'amplitude de la voie Y et $\arg(Z)$ le déphasage de la voie X par rapport à la voie Y .

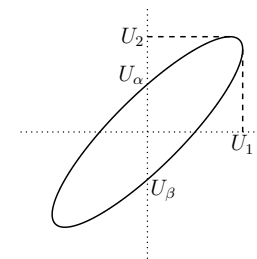
3° Détermination d'un déphasage à l'oscilloscope

Supposons que $X(t) = U_1 \cos(\omega t + \varphi_X)$ et $Y(t) = U_2 \cos(\omega t + \varphi_Y)$.

Le but est de trouver le déphasage de $X(t)$ par rapport à $Y(t)$, ie. de trouver $\varphi_X - \varphi_Y \stackrel{\text{not}}{=} \varphi$.

i. méthode de l'ellipse

→ Mettez l'oscilloscope en mode XY , l'affichage ressemble alors à la représentation ci-dessous.



→ À l'aide des positions GROUND (Terre) des voies X et Y , centrez l'ellipse sur l'écran de l'oscilloscope.

► Calcul des valeurs de U_α et U_β

U_α et U_β sont les valeurs de $Y(t)$ lorsque $X(t) = 0$.

Or $X(t) = U_1 \cos(\omega t + \varphi_X)$. Donc, si $X(t) = 0$, c'est que $\omega t + \varphi_X = \varepsilon \frac{\pi}{2}$ avec $\varepsilon = \pm 1$. D'où

$$\omega t = \varepsilon \frac{\pi}{2} - \varphi_X.$$

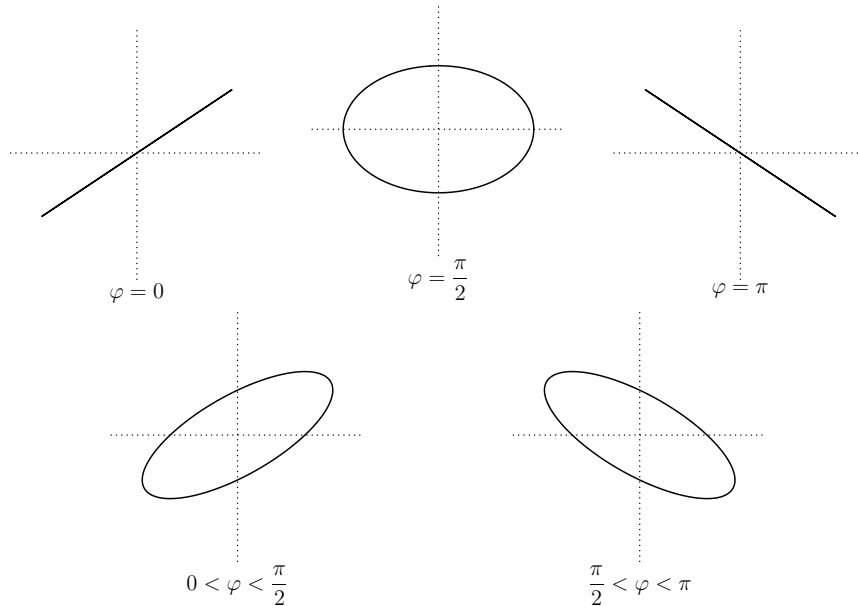
Nous avons alors : $Y(t) = U_2 \cos(\omega t + \varphi_Y) = U_2 \cos\left(\varepsilon \frac{\pi}{2} + \varphi_Y - \varphi_X\right) = U_2 \cos\left(\varepsilon \frac{\pi}{2} - \varphi\right)$.

→ Pour $\varepsilon = +1$: $Y(t) = \cos\left(\frac{\pi}{2} - \varphi\right) = U_2 \sin \varphi$.

→ Pour $\varepsilon = -1$: $Y(t) = U_2 \cos\left(-\frac{\pi}{2} - \varphi\right) = U_2 \cos\left(\frac{\pi}{2} + \varphi\right) = -U_2 \sin \varphi$.

Finalement : $\sin \varphi = \frac{U_\alpha}{U_2}$ (*).

► Différents cas possibles



► Inconvénients

φ est connu au signe près (en effet changer φ en $-\varphi$ ne modifie pas l'allure de la courbe). Pour déterminer le signe de φ il faut utiliser une autre méthode ou connaître le résultat (par l'observation temporelle des signaux par exemple).

Les valeurs de U_2 et de U_α sont parfois imprécises surtout avec les oscilloscopes analogiques qui ne disposent pas de curseurs.

► Avantages

Cette méthode permet de rapidement vérifier si deux signaux sont en quadrature. En effet, il est visuellement facile d'apprécier si l'ellipse obtenue est droite ou pas.

ii. autre méthode à retenir

Cette méthode est basée sur la définition même du déphasage à savoir le retard qu'un signal a sur un autre. Un retard d'une demi-période correspondant à un déphasage de $-\pi = -\frac{2\pi}{2}$, une avance d'un quart de période correspondant à un déphasage de $\frac{\pi}{2} = \frac{2\pi}{4}$. Nous allons donc rechercher quelle est, en terme de fraction de période, l'avance ou le retard d'un signal par rapport à un autre.

→ Affichez les deux voies X et Y simultanément en enlevant (éventuellement) leur composante continue (position AC).

→ Centrez les deux courbes sur l'écran de l'oscilloscope.

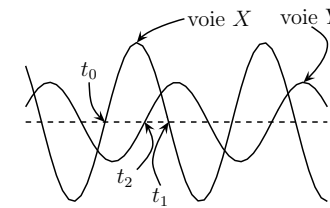
→ Repérez les instants t_0 , t_1 et t_2 tels que :

→ t_0 est un instant où X(t) intersecte le zéro en étant **croissant**, ie. $\omega t_0 + \varphi_X = -\frac{\pi}{2}$;

→ t_1 est le premier instant supérieur à t_0 où X(t) intersecte le zéro en étant **décroissant**, ie. $\omega t_1 + \varphi_X = \frac{\pi}{2}$;

→ t_2 est l'instant le plus proche (supérieur ou inférieur) de t_0 où Y(t) intersecte le zéro en étant **croissant**, ie. $\omega t_2 + \varphi_Y = -\frac{\pi}{2}$.

t_0 et t_1 vont nous permettre de déterminer la période du signal (puisque entre t_0 et t_1 il y a une demi-période) et t_0 et t_2 vont nous permettre de déterminer le décalage entre les deux signaux.



Nous avons donc :

$$t_1 - t_0 = \frac{\pi/2 - \varphi_X}{\omega} - \frac{-\pi/2 - \varphi_X}{\omega} = \frac{\pi}{\omega} \quad \text{et} \quad t_2 - t_0 = \frac{-\pi/2 - \varphi_Y}{\omega} - \frac{-\pi/2 - \varphi_X}{\omega} = \frac{\varphi_X - \varphi_Y}{\omega}$$

Et ainsi : $\varphi = \pi \times \frac{t_2 - t_0}{t_1 - t_0}$ (*).

iii. encore une méthode ... plus rapide

Il suffit d'aller dans le menu [TIME] de l'oscilloscope numérique et d'appuyer sur le bouton [PHASE]. L'oscilloscope affiche alors le déphasage de la voie Y par rapport à X (noté 2 → 1) en degré. Pour avoir le déphasage recherché, ie. celui de la voie X par rapport à la voie Y, il suffit de changer le signe. C'est sans aucun doute la méthode la plus rapide, toutefois l'oscilloscope manipulé n'est pas toujours numérique et il est bon de connaître et de savoir utiliser au moins une des deux précédentes ...

iv. remarques générales

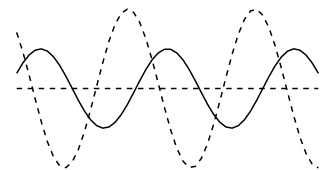
Par convention et sauf cas exceptionnels, un déphasage est compris entre $-\pi$ et $+\pi$. Il faudra donc veiller à ajouter ou à retrancher autant de fois que nécessaire 2π pour avoir $-\pi < \varphi < \pi$.

Il faut toujours vérifier que l'oscilloscope affiche la voie Y avec le signe voulu (Y ou -Y) : changer de signe est équivalent à changer la phase de π , ce qui peut changer bon nombre de résultats.

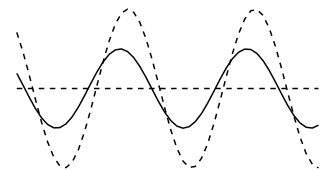
Vocabulaire (rappelons que $\varphi = \varphi_X - \varphi_Y$) :

→ si $\varphi > 0$, la voie X est dite « en avance » par rapport à la voie Y ;

→ si $\varphi < 0$, la voie X est dite « en retard » par rapport à la voie Y ;



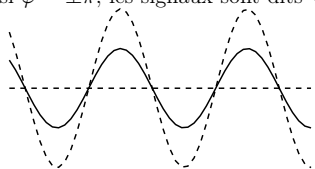
la voie en pointillés est en avance



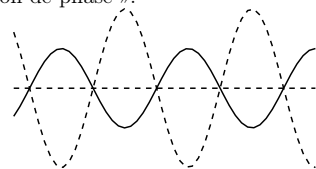
la voie en pointillés est en retard

→ si $\varphi = 0$, les signaux sont dits « en phase » ;

→ si $\varphi = \pm\pi$, les signaux sont dits « en opposition de phase ».

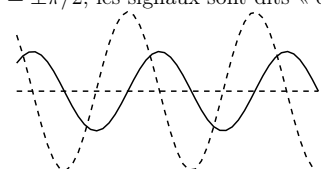


les deux voies sont en phase

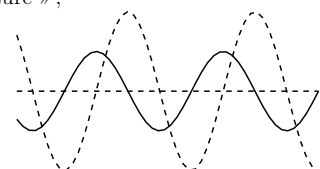


les deux voies sont en opposition de phase

→ si $\varphi = \pm\pi/2$, les signaux sont dits « en quadrature » ;



les deux voies sont en quadrature



les deux voies sont en quadrature

B Transformée de FOURIER d'un signal



La lecture de cette annexe est facultative et n'est là qu'à titre informatif.

1°) Rappels

Un signal $f(t)$ périodique de période $T = \frac{2\pi}{\omega}$ peut s'écrire sous les deux formes équivalentes suivantes, dites séries de FOURIER :

$$f(t) = c_0 + \sum_{n=1}^{+\infty} c_n \cos(n\omega t + \varphi_n) = a_0 + \sum_{n=1}^{+\infty} [a_n \cos(n\omega t) + b_n \sin(n\omega t)],$$

avec :

$$a_0 = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} f(t) dt \quad a_n = \frac{2}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} f(t) \cos(n\omega t) dt$$

$$b_n = \frac{2}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} f(t) \sin(n\omega t) dt \quad c_0 = a_0 \quad c_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2}$$

2°) Analyseur de spectre

i. série ou transformée de FOURIER ?

Pour déterminer les coefficients a_n , b_n (ou c_n), il est impératif non seulement d'avoir une fonction $f(t)$ périodique, mais aussi de connaître *a priori* sa période. C'est pourquoi, en pratique, nous allons plutôt déterminer sa transformée de FOURIER (TF) $\underline{g}(\omega)$ de la fonction $f(t)$.

La TF est définissable pour $f(t)$ non périodique, pourvu que $\int_{-\infty}^{+\infty} |f(t)|^2 dt < +\infty$ de la manière suivante :

$$\underline{g}(\omega) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) e^{-j\omega t} dt \stackrel{\text{not}}{=} \text{TF}(f(t))$$

Nous avons alors :

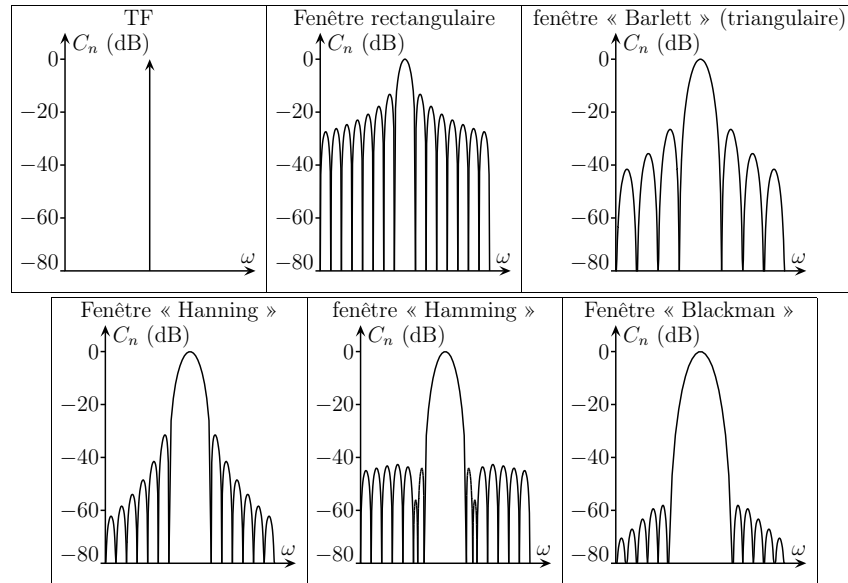
$$f(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{+\infty} \underline{g}(\omega) e^{j\omega t} d\omega \stackrel{\text{not}}{=} \text{TF}^{-1}(\underline{g}(\omega))$$

La fonction $\underline{g}(\omega)$ est appelée *spectre* de $f(t)$.

ii. une TF limitée

En pratique, il est impossible de déterminer la TF d'un signal car il faudrait le connaître depuis $t = -\infty$ et jusqu'à $t = +\infty$. Pour pallier ce problème, nous allons utiliser des « fenêtres » qui modifient le signal $f(t)$ en $F(t)$ de telle sorte que $F(t)$ soit non nul que sur une courte durée. Dans ces conditions, nous peut faire la TF de $F(t)$. L'inconvénient est que l'on obtient la TF de $F(t)$ et non de $f(t)$.

Pour un signal sinusoïdal pur, cela donne :



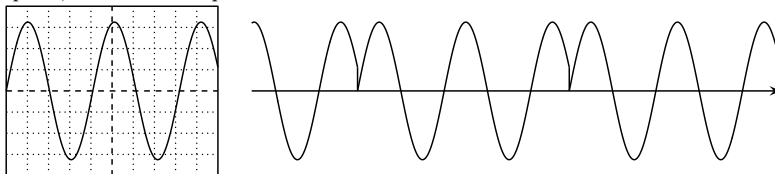
$$C_n = 20 \log \left| \frac{c_n}{\sqrt{2} c_0} \right|, \text{ avec } c_0 = 1 \text{ V}$$

Ainsi, si $C_n = 0,0$ dBV alors $c_n = 1,4$ V et si $C_n = 20$ dBV, $c_n = 14$ V.

Rappelons qu'une augmentation (resp. diminution) de 20 dB (ou dBV) correspond à une multiplication (resp. division) de l'amplitude par un facteur 10. Autrement dit à -40 dB et surtout -60 dB (ou dBV), nous observons des signaux de 1 mV par rapport à des signaux de 1 V : c'est le « bruit » du circuit qui est la plupart du temps inintéressant.

iii. c'est (encore) plus subtil

En fait, pour approcher la TF de $f(t)$, l'oscilloscope considère que le signal à analyser est le signal obtenu par concaténation de ce qui est affiché à l'écran. Ainsi, si l'écran ne fait pas exactement un nombre entier de période (ce qui est, en toute rigueur, impossible), il apparaît des discontinuités et, par conséquent, des hautes fréquences.



En plus, l'oscilloscope n'utilise pas toutes les valeurs de $X(t)$ affichées sur l'écran, mais « seulement » 1024 points régulièrement espacés : il *échantillonne* à la fréquence f_{ech} . Il faut alors respecter le critère de SHANNON, à savoir que la fréquence d'échantillonnage doit être supérieure au double de la fréquence maximale du spectre de $f(t)$. Si ce critère n'est pas respecté, il *peut* se passer ce que l'on appelle un « repliement de spectre ». Toutefois certains analyseur sont protégés de ce type de mésaventure grâce à un filtre « anti-repliement » (ou « anti-aliasing ») qui n'est autre qu'un filtre passe bas ne laissant passer que les fréquences respectant le critère de Shannon.

Enfin, pour calculer la TF d'un signal, l'oscilloscope utilise un algorithme dit « rapide », d'où le sigle FFT pour « Fast FOURIER Transform ».

iv. l'affichage sur l'écran

L'oscilloscope pourrait afficher les c_n en volts, mais comme les différentes valeurs peuvent différer de plusieurs ordres de grandeurs, on préfère afficher les C_n en dBV (décibel volt) :

