

## Semaine 6 : Série d'exercices sur les signaux [Solutions]

### 1 Bande passante

a)

1. La bande passante étant la plus grande des fréquences, elle ne change pas (on a ici changé que l'amplitude).
2. La bande passante ne change pas.
3. La bande passante est multipliée par 3, car toutes les fréquences du signal sont multipliées par 3.
4. La bande passante devient  $\max(B, f)$ .

En effet, comme  $f \neq f_1, f_2, \dots, f_n$ , on est sûr ici qu'on ajoute une sinusoïde de fréquence  $f$  au signal qui ne peut pas s'annuler avec une sinusoïde déjà présente dans le signal d'origine  $X$ . S'il se trouve que  $f > B$ , c'est donc que  $f$  est la plus grande fréquence du nouveau signal ; sinon, la bande passante reste la même.

5.  $X'(t) = \sum_{i=1}^n 2\pi f_i a_i \cos(2\pi f_i t + \delta_i) = \sum_{i=1}^n 2\pi f_i a_i \sin(2\pi f_i t + \delta_i + \frac{\pi}{2})$ , donc la bande passante ne change pas non plus ici.

b) On suppose donc ici que

$$X(t) = \sum_{i=1}^n a_i \sin(2\pi f_i t) \quad \text{et} \quad Y(t) = \sum_{j=1}^m b_j \sin(2\pi g_j t)$$

avec les bandes passantes respectives  $B_X = \max(f_1, f_2, \dots, f_n)$  et  $B_Y = \max(g_1, g_2, \dots, g_m)$ .

1. La bande passante de  $X(t) + Y(t)$  est en général égale à  $\max(f_1, f_2, \dots, f_n, g_1, g_2, \dots, g_m) = \max(B_X, B_Y)$ , *sauf* dans le cas où  $B_X = B_Y = B$ .

Dans ce cas, notons  $i$  et  $j$  respectivement deux indices où la bande passante  $B$  est atteinte dans respectivement  $X$  et  $Y$ , c.-à-d.  $B = f_i = g_j$ . S'il se trouve que  $a_i = -b_j$ , alors ces deux sinusoïdes de plus haute fréquence s'annulent dans le signal  $X(t) + Y(t)$ , d'où il en ressort que la bande passante de  $X(t) + Y(t)$  est *plus petite ou égale* à  $\max(B_X, B_Y) = B$ . Elle peut même être strictement plus petite si toutes les composantes les plus hautes s'annulent toutes. Tandis que dans le cas où  $B_X \neq B_Y$ , la sinusoïde ayant la plus grande fréquence parmi toutes ne peut s'annuler avec une autre.

2. Soit de nouveau  $f_i$  la plus haute fréquence du signal  $X$  et  $g_j$  la plus haute fréquence du signal  $Y$ . Donc  $f_i = B_X$  et  $g_j = B_Y$ . Le signal  $X(t) \cdot Y(t)$  comprend donc une composante de la forme

$$a_i b_j \sin(2\pi f_i t) \sin(2\pi g_j t)$$

qui, en utilisant le rappel de trigonométrie de l'énoncé, se réécrit de la manière suivante :

$$\frac{1}{2} a_i b_j (\cos(2\pi(f_i - g_j)t) - \cos(2\pi(f_i + g_j)t))$$

On peut vérifier que la composante de fréquence  $f_i + g_j$  ci-dessus est la composante de plus haute fréquence dans le signal  $X(t) \cdot Y(t)$ , et que c'est aussi la seule : toutes les autres composantes ont des fréquences plus faibles. On obtient donc que la bande passante de  $X(t) \cdot Y(t)$  est toujours égale à  $f_i + g_j = B_X + B_Y$ .

## 2 Signaux périodiques et apériodiques

a) Oui, dans ce cas,  $X_1(t) + X_2(t)$  est périodique de même période  $T$ . En effet :

$$X_1(t+T) + X_2(t+T) = X_1(t) + X_2(t) \quad \text{pour tout } t \in \mathbb{R}.$$

Notez que cela inclut le cas particulier  $X_2 = -X_1$  puisque tout signal constant est périodique (avec une infinité de périodes : tout  $T$  positif non nul est alors une période possible).

b) Dans ce cas, la réponse n'est pas forcément oui : ça dépend si le rapport  $T_1/T_2$  est rationnel (auquel cas le signal est périodique) ou non (auquel cas le signal est apériodique). Avec les deux exemples donnés dans l'énoncé, on voit bien graphiquement que le premier signal est périodique, tandis que le second ne l'est pas.

---

Pour aller plus loin (si vous aimez les maths) : la question de la périodicité de la somme de deux fonctions réelles périodiques est une question « difficile » dans le cas général.

Si par « signal » on entend « fonction réelle continue et bornée », alors on a le théorème suivant :

La somme de deux signaux périodiques non constants est périodique si et seulement si le rapport de leurs périodes est rationnel.

L'aspect suffisant du ratio rationnel est trivial : si  $T_1/T_2 \in \mathbb{Q}$  alors il existe  $p$  et  $q$  entiers naturels non nuls tels que  $pT_1 = qT_2$  ; notons  $T$  ce nombre ( $T = pT_1 = qT_2$ ) ; alors  $X_1(t+T) + X_2(t+T) = X_1(t+pT_1) + X_2(t+qT_2) = X_1(t) + X_2(t)$ .

L'aspect nécessaire par contre est plus difficile :

- la démonstration du cas continu borné utilise des notions avancées telles que sous-groupes additifs de  $\mathbb{R}$  et densité (au sens topologique) ;
- si on laisse tomber la continuité (ou même l'aspect borné, je crois), on peut construire des sommes de signaux périodiques de périodes ayant un ratio irrationnel qui soient périodiques.

**Note :** pour des signaux constants, la condition n'est évidemment pas vérifiée puisque tout nombre réel strictement positif est une période.

---

c) Dans le cas où  $T_1$  et  $T_2$  sont des nombres entiers, le rapport  $T_1/T_2$  est justement un nombre rationnel, donc le signal est périodique : tout multiple commun de  $T_1$  et  $T_2$  est une période. On peut le voir graphiquement, ou en vérifiant la formule suivante pour  $N$  multiple commun à  $T_1$  et  $T_2$  ( $N = kT_1 = \ell T_2$ ,  $k, \ell \geq 1$ ) :

$$X_1(t+N) + X_2(t+N) = X_1(t+kT_1) + X_2(t+\ell T_2) = X_1(t) + X_2(t).$$

S'il ne s'agit pas de signaux constants, alors la plus petite période est le plus petit multiple commun de  $T_1$  et  $T_2$  :

$$M = \text{ppcm}(T_1, T_2) = \min\{N \geq 1 : \text{il existe } k, \ell \geq 1 \text{ tels que } N = kT_1 = \ell T_2\}.$$

d) La période de la sinusoïde fondamentale est  $T_0 = 1/f_0$ , et les périodes des harmoniques sont de la forme  $T_n = 1/(nf_0)$ . Ainsi,  $T_0$  est le plus petit multiple commun à toutes ces périodes, et le signal est donc périodique de période  $T_0$  (à nouveau, ceci se voit bien graphiquement).

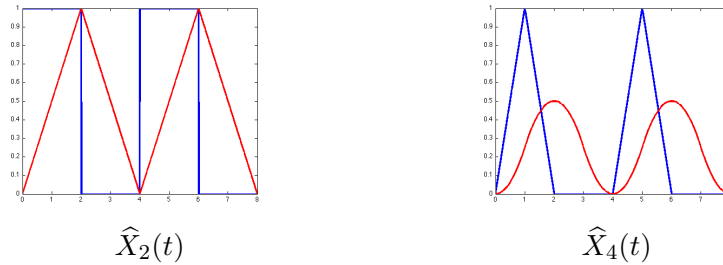
### 3 Interlude musical

Un échantillon est produit 44'000 fois par secondes car la fréquence représente l'inverse de la période entre deux échantillons. Chaque échantillon est représenté sur 32 bits et il y a 3'600 secondes dans une heure. On trouve donc que la taille du fichier est de  $3600 \times 44000 \times 32 \simeq 4.72$  gibibits  $\simeq 604$  Mio.

### 4 Filtre à moyenne mobile

a) Après un passage à travers un filtre à moyenne mobile de période  $T_c = T$ , les signaux  $\widehat{X}_1(t)$  et  $\widehat{X}_3(t)$  sont tous les deux constants au cours du temps et prennent la valeur  $1/2$ .

Les signaux  $\widehat{X}_2(t)$  et  $\widehat{X}_4(t)$  après passage à travers le même filtre à moyenne mobile ont la forme suivante (sur les graphes ci-dessous,  $T = 2$ ) :



**Note :** le filtre à moyenne mobile est définie par une intégrale. Il est donc constitué de (morceaux de) *primitives* du signal en entrée : (au plus) des droites si le signal est constant et (au plus) des paraboles si le signal est affine.

b) Un signal périodique de période  $T$  sort constant d'un filtre à moyenne mobile de période  $T_c = T$ . Pour  $t \in \mathbb{R}$ , soit  $k = \lfloor \frac{t}{T} \rfloor$ . On a donc  $kT \leq t < (k+1)T$ , et :

$$\begin{aligned} \widehat{X}(t) &= \frac{1}{T_c} \int_{t-T_c}^t X(s) ds = \frac{1}{T} \left( \int_{t-T}^{kT} X(s) ds + \int_{kT}^t X(s) ds \right) \\ &= \frac{1}{T} \left( \int_{t-T}^{kT} X(s+T) ds + \int_{kT}^t X(s) ds \right) = \frac{1}{T} \left( \int_t^{(k+1)T} X(u) du + \int_{kT}^t X(s) ds \right) \\ &= \frac{1}{T} \int_{kT}^{(k+1)T} X(s) ds \quad \text{qui ne dépend pas de } t. \end{aligned}$$

Les exemples  $X_1(t)$  et  $X_3(t)$  du point a) illustrent bien ce fait.

c) On a vu au cours que

$$\widehat{X}(t) = \frac{1}{T_c} \int_{t-T_c}^t \sin(2\pi fs) ds = \frac{\cos(2\pi f(t-T_c)) - \cos(2\pi ft)}{2\pi f T_c}.$$

En utilisant une des formules du rappel de trigonométrie, on trouve que

$$\widehat{X}(t) = \frac{2 \sin(2\pi f(t - T_c/2)) \sin(\pi f T_c)}{2\pi f T_c}.$$

Donc pour tout  $t \in \mathbb{R}$ , on a

$$|\widehat{X}(t)| = \left| \frac{\sin(\pi f T_c) \sin(2\pi f(t - T_c/2))}{\pi f T_c} \right| \leq \left| \frac{\sin(\pi f T_c)}{\pi f T_c} \right| |\sin(2\pi f(t - T_c/2))| \leq |\operatorname{sinc}(f T_c)|.$$

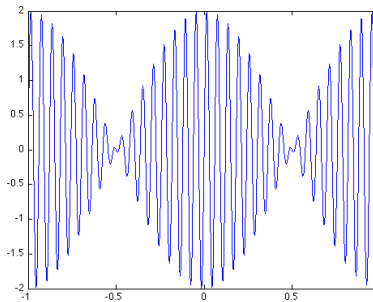
Lorsque que la période  $T = \frac{1}{f}$  de la sinusoïde coïncide avec la période  $T_c$  du filtre à moyenne mobile, le signal sortant est nul, ce qui est encore un cas particulier de ce qu'on a trouvé au point b).

## 5 Accordage de guitare et phénomène dit de « battement »

a) Lorsque  $f_2 = f_1 + \varepsilon$ , avec  $\varepsilon$  petit mais non nul, on trouve que (cf. encore une fois le rappel de trigonométrie)

$$\begin{aligned} X_1(t) + X_2(t) &= \sin(2\pi f_1 t) + \sin(2\pi f_2 t) = 2 \cos(\pi(f_2 - f_1)t) \sin(\pi(f_1 + f_2)t) \\ &= 2 \cos(\pi \varepsilon t) \sin(\pi(2f_1 + \varepsilon)t). \end{aligned}$$

Cette onde est donc faite d'une composante qui oscille lentement ( $\cos(\pi \varepsilon t)$ ) et d'une autre qui oscille rapidement ( $\sin(\pi(2f_1 + \varepsilon)t)$ ). Elle ressemble à ceci (pour  $f_1 = 16\text{Hz}$  et  $f_2 = 17\text{Hz}$ ) :



C'est la composante qui oscille lentement que l'on entend clairement à l'oreille. Une illustration intéressante d'un phénomène de battement est disponible à l'adresse :

[http://fr.wikipedia.org/wiki/Battement\\_binaural](http://fr.wikipedia.org/wiki/Battement_binaural)

b) Lorsque  $f_2 = f_1$ , l'onde résultante est simplement :

$$X_1(t) + X_2(t) = \sin(2\pi f t) + \sin(2\pi f_1 t) = 2 \sin(2\pi f_1 t).$$

Dans ce cas, l'amplitude est doublée (remarquez qu'on avait aussi un facteur 2 dans le premier cas), mais on n'entend pas de battement.