STÉPHANE GAUTIER • ARNAUD MARGOLLÉ

2e édition

Physique pour l'audiovisuel

Traitement du signal analogique
Acoustique

BTS AUDIOVISUELS
& DESIGN GRAPHIQUE
DUT & LICENCES AUDIOVISUEL,
CINÉMA & SON

- Cours complet
- QCM, exercices et sujets d'examens
- Tous les corrigés détaillés

deboeck SUPÉRIEUR

Stéphane Gautier & Arnaud Margollé

Physique pour l'audiovisuel

Traitement du signal analogique
Acoustique

2e édition

Cours • QCM & exercices corrigés

BTS AUDIOVISUEL & DESIGN GRAPHIQUE
DUT & LICENCES AUDIOVISUEL, CINÉMA & SON

deboeck SUPÉRIEUR

Pour le même public (ouvrage complémentaire)

Stéphane Gautier & Arnaud Margollé,
Physique pour l'audiovisuel
Traitement du signal numérique • Optique • Photométrie • Colorimétrie
Cours • QCM et exercices corrigés – BTS, DUT & Licence, 352 pages

En couverture : © Kaisprenger/Fotolia
Maquette intérieure : Hervé Soulard/Nexeme
Mise en pages des auteurs
Maquette de couverture : Primo&Primo
Couverture : SCM, Toulouse

Dépôt légal :
Bibliothèque royale de Belgique : 2020/13647/069
Bibliothèque nationale, Paris : avril 2020
ISBN : 978-2-8073-2750-4

Table des matières

Avant-propos

Un produit audiovisuel est la mise en œuvre d'un ensemble de compétences spécifiques à chaque corps de métiers et reposant sur un socle commun de connaissances. Étudier les sciences physiques appliquées à l'audiovisuel permet de maîtriser les concepts scientifiques sur lesquels reposent toutes les technologies actuelles et à venir.

Consacré au traitement du signal analogique et à l'acoustique, plus spécifiques aux métiers du son, cet ouvrage constitue le premier de deux volumes destinés principalement aux étudiants de BTS audiovisuel. Le second volume aborde le traitement du signal numérique, l'optique géométrique, la photométrie, la colorimétrie et l'image numérique.

Chaque chapitre est constitué de quatre parties :

- un cours ponctué d'applications simples,
- une fiche de synthèse récapitulant les relations et les théorèmes à retenir,
- des QCM suivis d'une série d'exercices de difficultés croissantes ainsi que des extraits de sujet du BTS audiovisuel avec les options concernées.
- une correction détaillée.

Il est à noter que le chapitre Acoustique architecturale ne concerne que l'option métiers du son. À la fin de cet ouvrage, figurent un formulaire présentant tous les outils mathématiques nécessaires à la compréhension des thèmes abordés, ainsi qu'un index des termes caractéristiques, permettant une lecture ciblée des thématiques.

Cette réédition reprenant les sujets du BTS 2019, chaque étudiant pourra ainsi se situer par rapport au niveau d'exigence actuel de l'examen.

Remerciements

Les auteurs remercient tous ceux qui ont contribué à la réalisation de ce premier volume de la collection « Toute la physique pour l'audiovisuel » : Jean Yves Tillard, Arnaud Lajournade et David Coupée dont les suggestions et les corrections ont été à l'origine de discussions et de réflexions qui ont contribué de façon significative à l'amélioration de ce document.

Ils remercient également Ludovic Lefèbre pour son illustration sur le spectrogramme et Carine Simon pour ses précieux conseils sur Illustrator.

Chapitre 1

Analyse temporelle des signaux

1. Les différents types de signaux

1.1. Définition d'un signal

Un signal est la représentation physique de l'information qu'il transporte, de sa source vers son destinataire. Il correspond à une grandeur physique dont les variations (en général dans le temps t) contiennent une information. Si cette grandeur peut être une pression, une intensité lumineuse, c'est le plus souvent une tension.

Le signal électrique est de loin le plus important, car de nombreuses grandeurs physiques peuvent être converties en grandeurs électriques à l'aide de capteurs. Un microphone, par exemple, permet de convertir une onde acoustique en un signal électrique appelé signal audio. Le capteur d'une caméra permet, quant à lui, de convertir l'éclairement reçu en un signal électrique qui, mis en forme, donnera le signal vidéo. Les systèmes électroniques permettent en outre de traiter facilement les signaux électriques.

Pour visualiser les variations du signal électrique en fonction du temps, on utilise un oscilloscope et on observe l'oscillogramme (ou chronogramme) sur l'écran (*cf.* figure 1.1).

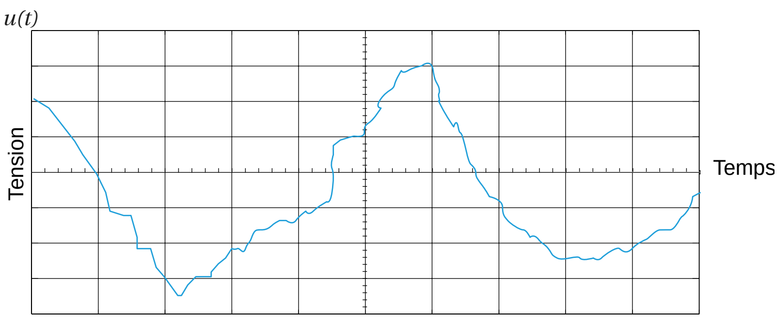


Figure 1.1. Oscillogramme d'un signal

1.2. Classification morphologique des signaux

1.2.1. Signaux analogiques

Les signaux analogiques sont continus dans le temps et en valeurs (*cf.* figure 1.2). On les décrit mathématiquement comme une fonction du temps $u(t)$ à valeurs continues.

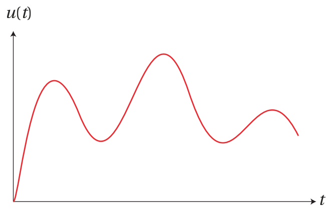


Figure 1.2. Signal analogique

1.2.2. Signaux quantifiés

Les signaux quantifiés sont continus dans le temps mais discret en valeurs (*cf.* figure 1.3). On les décrit mathématiquement comme une fonction du temps $u_q(t)$ à valeurs discrètes.

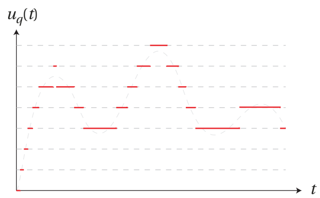


Figure 1.3. Signal quantifié

1.2.3. Signaux échantillonnés

Les signaux échantillonnés sont discrets dans le temps mais continus en valeurs (*cf.* figure 1.4). On les décrit mathématiquement comme une suite $u(n)$ indexée par le temps à valeurs continues.

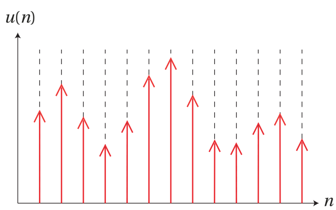


Figure 1.4. Signal échantillonné

1.2.4. Signaux numériques

Les signaux numériques sont discret dans le temps et en valeurs (*cf.* figure 1.5). On les décrit mathématiquement comme une suite $u_q(n)$ indexée par le temps à valeurs discrètes.

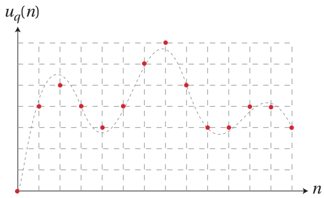


Figure 1.5. Signal numérique

2. Caractéristiques temporelles des signaux périodiques

Les signaux périodiques sont des signaux qui reproduisent dans le temps un motif identique à intervalles de temps réguliers (*cf.* figure 1.6).

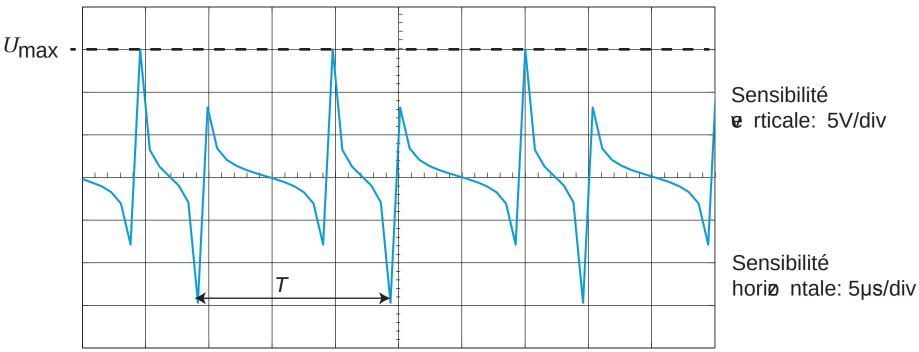


Figure 1.6. Exemple de signal périodique $U_{max} = 15\,\mathrm{V}$, T$=15\,\mu\mathrm{s}$

2.1. Période et fréquence

T : période ou durée d'un motif élémentaire en seconde.
f : fréquence ou nombre de motifs élémentaires par seconde (en Hz).
Ces deux grandeurs sont liées par la relation :

$$\boxed{f = \frac{1}{T} \text{ ou } T = \frac{1}{f}} \tag{1.1}$$

2.2. Amplitude

L'amplitude instantanée d'un signal à l'instant t s'exprime par la fonction $u(t)$. La valeur maximale (ou crête) de l'amplitude $u(t)$ est notée U_{max}.

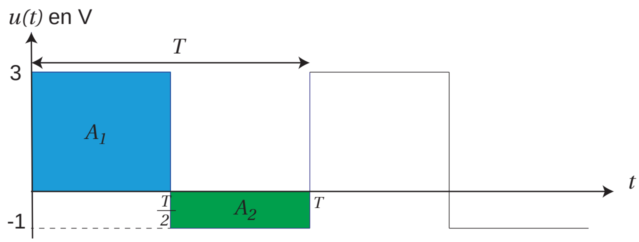
2.3. Valeur moyenne

La valeur moyenne d'un signal est appelée composante continue. Elle est définie par la relation :

$$\langle u \rangle = \frac{1}{T}\int_0^T u(t)\mathrm{d}t \qquad (1.2)$$

Méthode : Calcul d'une intégrale avec la méthode des aires

L'intégrale représente l'aire algébrique entre la courbe du signal et l'axe des abscisses : elle est comptée positive, si elle est située au-dessus de l'axe, et négative lorsqu'elle est sous l'axe. Si le signal a une forme géométrique simple, elle se calcule facilement.



Ici, $\langle u \rangle = \dfrac{A_1 - A_2}{T} = \dfrac{3\,\text{V} \times \frac{T}{2} - 1\,\text{V} \times \frac{T}{2}}{T} = 1\,\text{V}$.

Pour des formes plus complexes, il faut utiliser l'expression analytique du signal $u(t)$ et calculer l'intégrale (1.2).

Remarque

Un signal de valeur moyenne nulle est appelé signal alternatif ou bipolaire.

2.4. Parties continue et alternative d'un signal périodique

Comme le montre la figure 1.7, tout signal périodique $u(t)$ peut s'écrire comme la somme d'un signal alternatif $u_a(t)$ et de sa valeur moyenne $\langle u \rangle$:

$$u(t) = \langle u \rangle + u_a(t) \qquad (1.3)$$

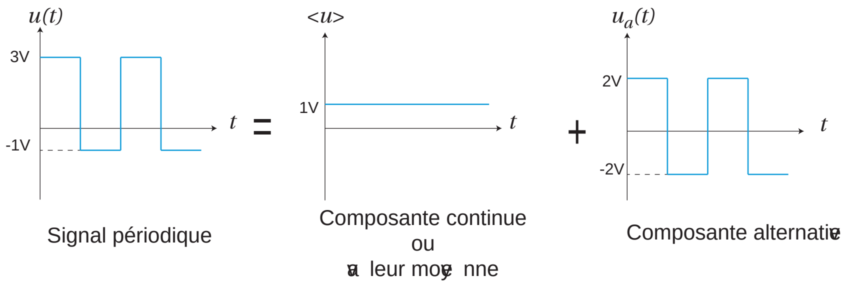


Figure 1.7. Exemple de parties continue et alternative d'un signal

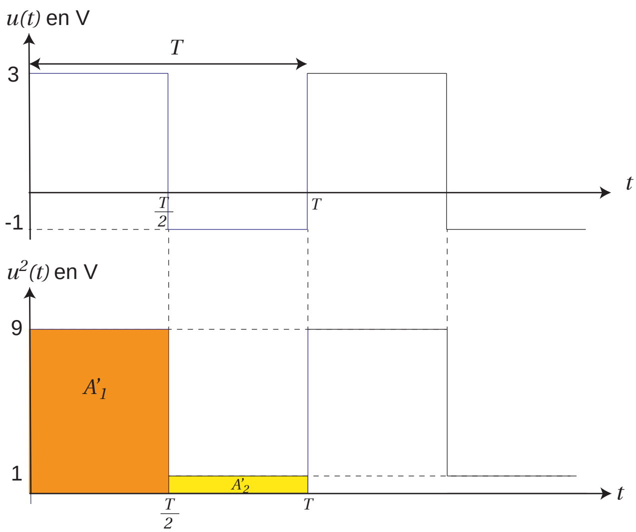
2.5. Valeur efficace

La valeur efficace d'un signal est la valeur d'un signal continu ayant la même puissance. Elle se calcule avec la formule suivante :

$$U = \sqrt{\langle u^2 \rangle} = \sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T u^2(t)\mathrm{d}t} \tag{1.4}$$

Méthode : Calcul d'une valeur efficace avec la méthode des aires

Considérons le signal $u(t)$ de l'exemple précédent et calculons sa valeur efficace. On trace $u^2(t)$ en concordance des temps.



…

On calcule $\langle u^2 \rangle$ avec la méthode des aires :

$$\langle u^2 \rangle = \frac{9\,\mathrm{V}^2 \times \frac{T}{2} + 1\,\mathrm{V}^2 \times \frac{T}{2}}{T} = 5\,\mathrm{V}^2$$

On calcule ensuite la valeur efficace :

$$U = \sqrt{\langle u^2 \rangle} = \sqrt{5} = 2{,}23\,\mathrm{V}$$

Le signal $u(t)$ est donc aussi efficace qu'un signal continu de 2,23 V

3. Caractéristiques temporelles du signal sinusoïdal

3.1. Expression et représentation d'un signal sinusoïdal

De tous les signaux périodiques, le signal sinusoïdal est le plus important. Il est représenté à la figure 1.8.

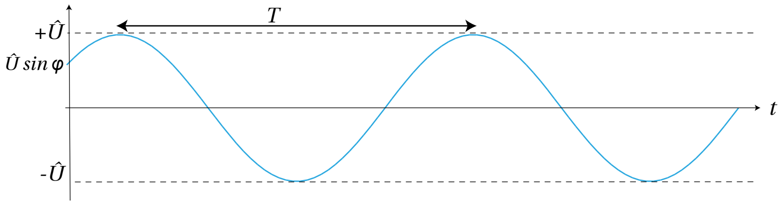


Figure 1.8. Représentation temporelle de $u(t) = \hat{U}\sin(\omega t + \varphi)$

Mathématiquement, il s'écrit selon la fonction :

$$\boxed{u(t) = \hat{U}\sin(\omega t + \varphi)} \tag{1.5}$$

où :

- $\hat{U}$ est l'amplitude maximale en V ;
- ω est la pulsation en rad s^{-1} ;
- φ est la phase à l'origine des temps en rad.

Pulsation, période et fréquence sont liées par les relations :

$$\boxed{\omega = 2\pi f = \frac{2\pi}{T}} \tag{1.6}$$

3.2. Représentation de Fresnel

On peut associer au signal sinusoïdal $u(t)$ un vecteur de Fresnel $\vec{U}$ dont :

- la longueur est égale à l'amplitude du signal $\hat{U}$;
- l'angle polaire est égal à la phase à l'origine des temps φ.

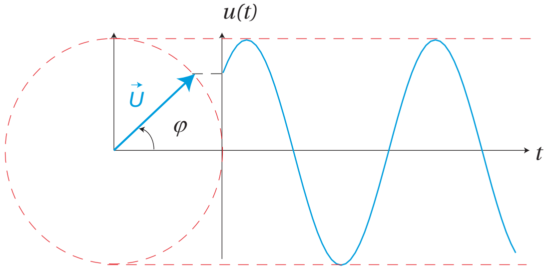


Figure 1.9. Représentation de Fresnel et représentation temporelle de $u(t) = \hat{u}\sin(\omega t + \varphi)$

Méthode : Déterminer l'expression d'un signal sinusoïdal par lecture graphique

Soit le signal sinusoïdal suivant.

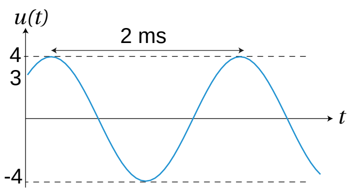


Figure 1.10

Graphiquement, on lit :

- l'amplitude $\hat{U} = 4\,\text{V}$;
- la période $T = 2\,\text{ms}$. On en déduit la pulsation $\omega = \dfrac{2\pi}{2\times 10^{-3}} = 1\,000\pi\,\text{rad}\,\text{s}^{-1}$;
- pour la phase à l'origine, on trace le vecteur de Fresnel.

Donc $\varphi = \sin^{-1}\dfrac{3}{4} = 0{,}84\,\text{rad}$.

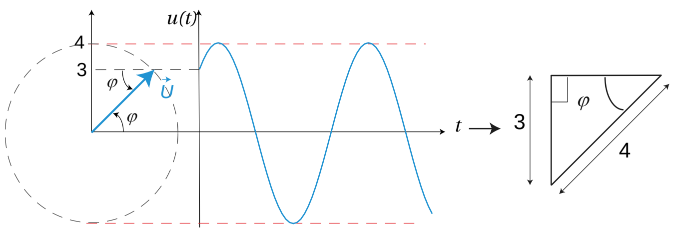


Figure 1.11

On en déduit $u(t) = 4\sin(1\,000\pi t + 0{,}84)$.

3.3. Valeur moyenne d'un signal sinusoïdal

Sur une période, la représentation temporelle d'un signal sinusoïdal est centrée sur 0 (*cf.* figure 1.12). Les aires A_1 et A_2 sont égales.

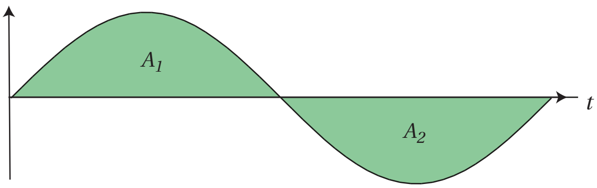


Figure 1.12

On en déduit donc que $\langle u \rangle = 0$. Le signal sinusoïdal est donc alternatif.

3.4. Valeur efficace d'un signal sinusoïdal

Rappel

$\sin^2 x = \dfrac{1 - \cos 2x}{2}$

Graphiquement, cette relation s'exprime de la manière suivante.

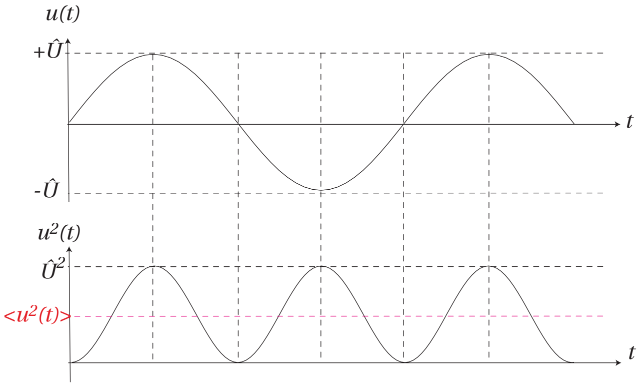


Figure 1.13

On voit que $u^2(t)$ est centré sur la valeur $\left\langle u^2 \right\rangle = \dfrac{\hat{U}^2}{2}$. On en déduit que $U = \sqrt{\langle u^2 \rangle} = \sqrt{\dfrac{\hat{U}^2}{2}}$, soit :

$$\boxed{U = \frac{\hat{U}}{\sqrt{2}}} \qquad (1.7)$$

Une autre démonstration à partir de l'expression du signal sinusoïdal est donnée à l'exercice 6 p. 17.

4. Caractéristiques temporelles des signaux quelconques

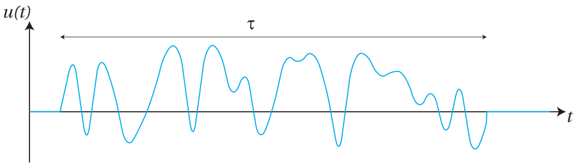


Figure 1.14. Exemple de signal non périodique de durée τ

Les signaux réels ne peuvent être rigoureusement périodiques. En effet, ils ont une durée finie notée τ (*cf.* figure 1.14). On peut reprendre la définition de la valeur moyenne (*cf.* relation (1.2)) et de la valeur efficace (*cf.* relation (1.4)) sur une durée τ.

4.1. Valeur moyenne

$$\langle u \rangle = \frac{1}{\tau}\int_0^{\tau} u(t)\mathrm{d}t \tag{1.8}$$

4.2. Valeur efficace

$$U = \sqrt{\frac{1}{\tau}\int_0^{\tau} u^2(t)\mathrm{d}t} \tag{1.9}$$

4.3. Niveau de tension

Qu'ils soient périodiques ou non, il est d'usage d'exprimer les valeurs efficaces en décibels. Cela permet de resserrer l'écart entre fortes et faibles valeurs efficaces pour les signaux présentant une grande dynamique.

$$\boxed{L(\mathrm{dB}) = 20\log\left(\frac{U}{U_{\mathrm{ref}}}\right) \text{ et } U = U_{\mathrm{ref}}\cdot 10^{\frac{L}{20}}} \tag{1.10}$$

avec $U_{\mathrm{ref}} = 0{,}775\,\mathrm{V}$ pour les dBu et $U_{\mathrm{ref}} = 1\,\mathrm{V}$ pour les dBV.

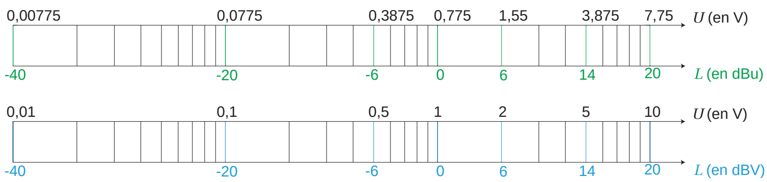
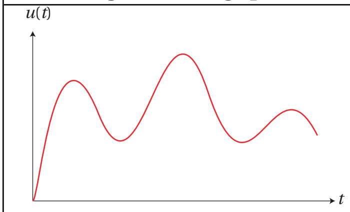
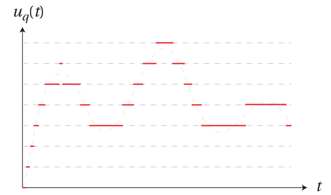
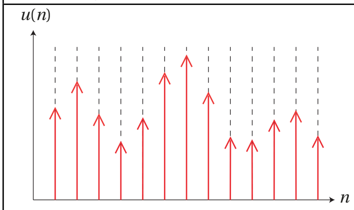
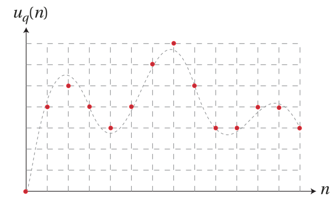


Figure 1.15. Correspondance entre V, dBV et dBu

Fiche de synthèse

Classification des signaux

		Amplitude	
		Continue	Discrète
Temps	Continu	Signal analogique 	Signal quantifié 
	Discret	Signal échantillonné 	Signal numérique 

Signaux périodiques Les signaux périodiques reproduisent à l'identique un motif élémentaire de durée T appelée période du signal. La fréquence f est le nombre de périodes par seconde.

$$f = \frac{1}{T} \text{ ou } T = \frac{1}{f}$$

Caractéristiques temporelles des signaux

Valeur moyenne La valeur moyenne est la composante continue d'un signal.

$$\langle u \rangle = \frac{1}{\tau} \int_0^{\tau} u(t)\mathrm{d}t$$

Valeur efficace La valeur efficace représente la valeur d'un signal continu ayant la même puissance.

$$U = \sqrt{\frac{1}{\tau} \int_0^{\tau} u^2(t)\mathrm{d}t}$$

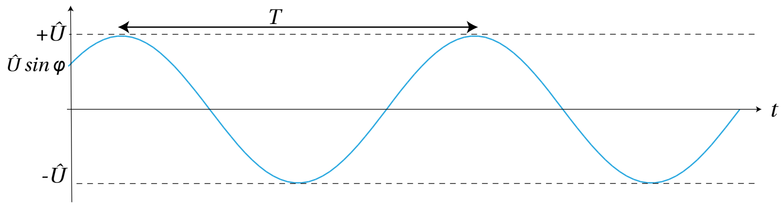
où τ est la durée du signal ($\tau = T$ pour les signaux périodiques). Ces intégrales peuvent se calculer avec la méthode des aires pour des signaux de forme géométrique simple.

Niveau de tension

$$L(\mathrm{dB}) = 20\log\left(\frac{U}{U_{\mathrm{ref}}}\right) \text{ et } U = U_{\mathrm{ref}} \cdot 10^{\frac{L}{20}}$$

avec $U_{\mathrm{ref}} = 0{,}775\,\mathrm{V}$ pour les dBu et $U_{\mathrm{ref}} = 1\,\mathrm{V}$ pour les dBV.

Le signal sinusoïdal



$$u(t) = \hat{U}\sin(\omega t + \varphi), \text{ où}$$

- $\cdot\hat{U}$ est l'amplitude maximale en V,
- $\cdot\omega$ est la pulsation en rad s^{-1},
- $\cdot\varphi$ est la phase à l'origine en rad.

Relations

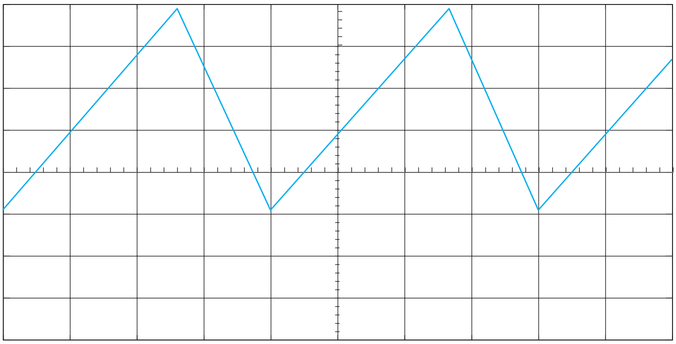
$$\omega = 2\pi f \text{ et } U = \frac{\hat{U}}{\sqrt{2}}$$

QCM et exercices

QCM

QCM 1

Le signal suivant :



☐ a une valeur moyenne non nulle.
☐ est périodique de fréquence $f = 25\,\text{kHz}$.
☐ peut se décomposer en une partie continue et une partie alternative.

QCM 2

Le signal sinusoïdal d'expression $u(t) = 3\sin(2\,000\pi t + \frac{\pi}{6})$:

☐ a une fréquence de 1000 Hz.
☐ a une phase à l'origine de 60°.
☐ a une valeur efficace de 3 V.
☐ a un niveau de tension de 6,5 dBu.

QCM 3

Un signal sinusoïdal de fréquence 200 Hz et de valeur efficace 1 V :

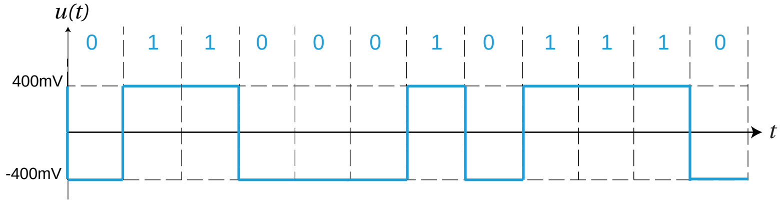
☐ a une période de 5 ms.
☐ a une pulsation de 628 rad s^{-1}.
☐ a un niveau de tension de 0 dBV.
☐ a une amplitude de 1 V.

QCM 4

Un signal NRZ est généré à partir d'une source binaire délivrant des 0 et des 1 :

- à 1 est associé la valeur +400 mV
- à 0 est associé la valeur -—400 mV

La suite de 0 et de 1 est totalement aléatoire, mais la probabilité d'avoir 0 ou 1 est la même et vaut 50 %, comme le montre l'exemple ci-dessous.



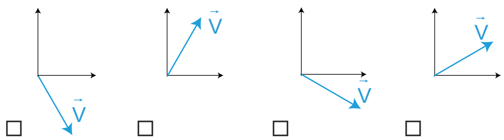
Sur une longue durée, le signal $u(t)$ est :

☐ alternatif. ☐ de valeur efficace $U = 400\,\text{mV}$.
☐ périodique. ☐ de valeur moyenne $\langle u \rangle = 400\,\text{mV}$.

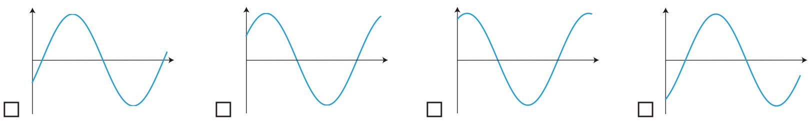
QCM 5

Soit une tension sinusoïdale d'expression $v(t) = \hat{V}\sin(\omega t + \dfrac{\pi}{3})$.

1) Son diagramme de Fresnel est :



2) Sa représentation temporelle est :



Exercices

Exercice 1 Valeur moyenne d'un signal périodique

Soit le signal $u(t)$ de la figure 1.16.

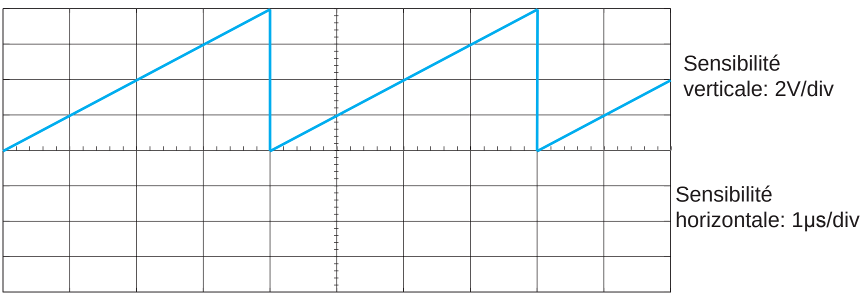


Figure 1.16

1) Déterminer sa période T et en déduire sa fréquence f.
2) Déterminer sa valeur maximale $U_{\max}$ et sa valeur minimale $U_{\min}$.
3) Calculer sa valeur moyenne $\langle u \rangle$ avec la méthode des aires.
4) Tracer la partie continue et la partie alternative de $u(t)$.

* Exercice 2 Valeurs moyenne et efficace de signaux périodiques non sinusoïdaux

Soit le signal représenté sur la figure 1.17.

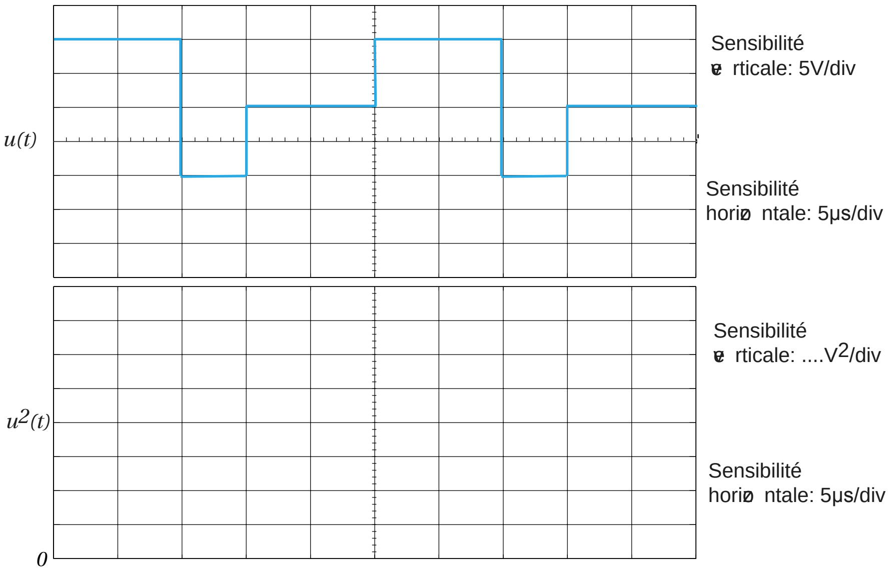


Figure 1.17

1) Déterminer la période et en déduire f.
2) Déterminer la valeur maximale $U_{\max}$ et la valeur minimale $U_{\min}$ de la tension $u(t)$.
3) Calculer $\langle u \rangle$ avec la méthode des aires.
4) Tracer $u^2(t)$ en concordance des temps sur la figure 1.17.
5) Calculer $\left\langle u^2 \right\rangle$ et en déduire U.

** Exercice 3 Valeurs moyenne et efficace d'un signal rectangulaire

Le signal représenté sur la figure 1.18 est périodique, de période notée T. Il est égal à E de 0 à αT et nul de αT à T. α, appelé rapport cyclique, est compris entre 0 et 1.

1) Exprimer $\langle u \rangle$, la valeur moyenne de $u(t)$ en fonction de E et α.
2) Exprimer U, la valeur efficace de $u(t)$ en fonction de E et α.
3) Tracer l'oscillogramme de la composante alternative de $u(t)$, notée $u_a(t)$, en indiquant l'amplitude maximale et l'amplitude minimale de $u_a(t)$.
4) Exprimer U_a, la valeur efficace $u_a(t)$.

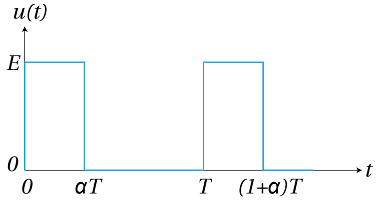


Figure 1.18

* Exercice 4 Caractéristiques temporelles d'un signal numérique

Le signal numérique de la figure 1.19 représente les échantillons d'un fichier .wav. Le signal est échantillonné à la fréquence $f_e = 48\,\text{kHz}$.

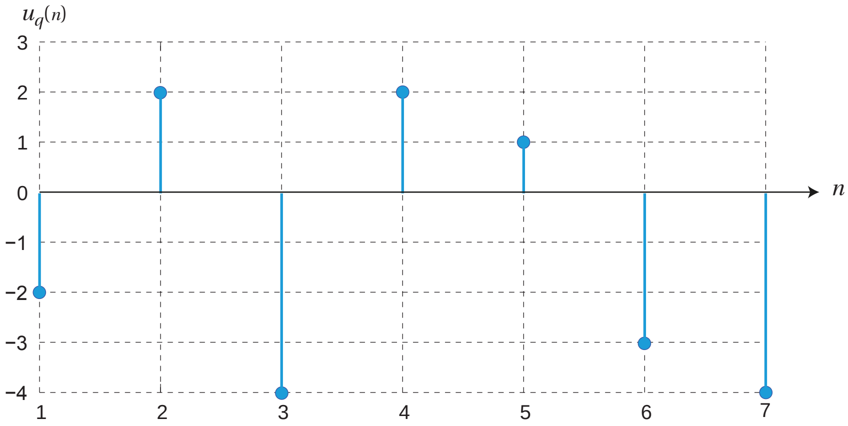


Figure 1.19

Rappel

Pour un signal échantillonné, la valeur moyenne est donnée par l'expression suivante :

$$\langle u \rangle = \frac{1}{N} \cdot \sum_{n=1}^{n=N} u(n)$$

la valeur efficace est donnée par l'expression :

$$U = \sqrt{\frac{1}{N} \cdot \sum_{n=1}^{n=N} u^2(n)}$$

1) Pourquoi le signal $u_q(n)$ est-il numérique ?
2) Calculer la durée T_e entre 2 échantillons successifs appelée période d'échantillonnage.
3) Calculer la valeur moyenne du signal.
4) Calculer la valeur efficace du signal.

** Exercice 5 Principe d'un onduleur MLI

Le principe de l'onduleur MLI est représenté sur la figure 1.20. Le signal $v_e(t)$ est sinusoïdal et le signal $v_{\text{ref}}(t)$ a une forme de dent de scie. Le comparateur donne en sortie un signal $v_c(t)$ modulé en largeur d'impulsion qui est égal à :

- $v_c(t) = 5\,\text{V}$ si $v_e(t) > v_{\text{ref}}(t)$,
- $v_c(t) = 0\,\text{V}$ si $v_e(t) \leq v_{\text{ref}}(t)$.

Les signaux visualisés à l'oscilloscope sont représentés à la figure 1.21

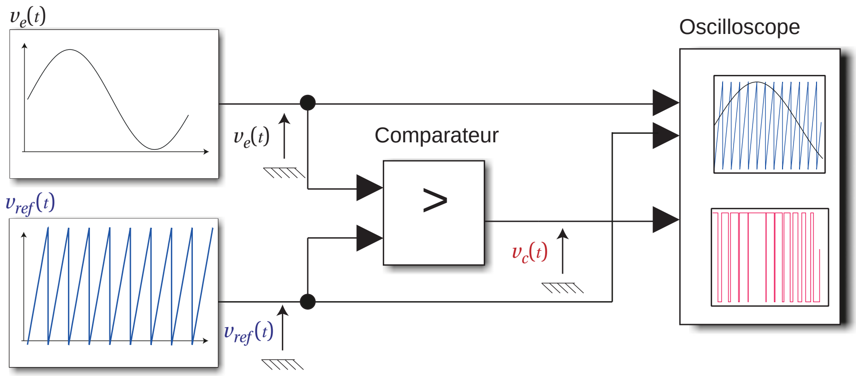


Figure 1.20

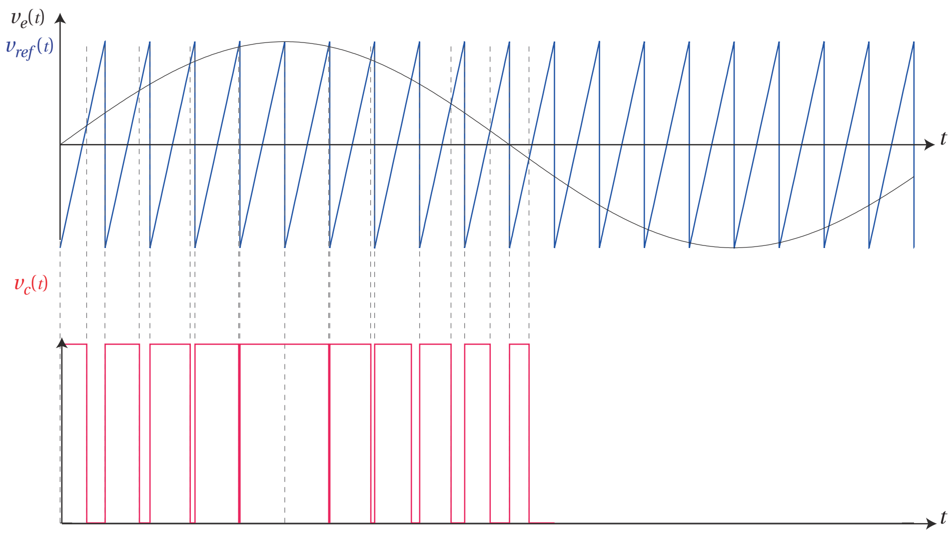


Figure 1.21

1) Compléter le signal $v_c(t)$ sur la figure 1.21.
2) À quelle classe (analogique, numérique, quantifié, échantillonné) appartiennent les signaux $v_{\text{ref}}(t)$, $v_e(t)$ et $v_c(t)$.

*** Exercice 6 Valeur efficace et amplitude d'un signal sinusoïdal

Rappel

$$\sin^2 a x = \frac{1 - \cos 2a x}{2} \quad \text{et} \quad \int \cos a x \mathrm{d}x = \frac{\sin a x}{a}$$

Soit $u(t) = \hat{U} \sin(\omega t)$ avec $\omega = 2\pi f$. Montrer que $U = \dfrac{\hat{U}}{\sqrt{2}}$.

* Exercice 7 Détermination graphique de l'expression d'un signal sinusoïdal

Soit le signal sinusoïdal représenté sur la figure 1.22.

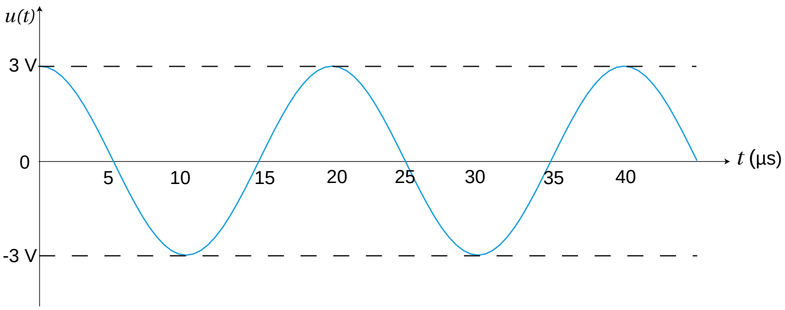


Figure 1.22

1) À partir du graphique, déterminer $\hat{U}$, ω et φ.
2) En déduire l'expression de $u(t)$.

* Exercice 8 Signal sinusoïdal

Soit $u(t)$ un signal audio test, dont les caractéristiques sont les suivantes :

- $L = 4\,\text{dBu}$;
- $f = 1000\,\text{Hz}$;
- forme d'onde sinusoïdale avec une phase nulle à l'origine des temps.

1) Calculer la pulsation ω ainsi que la valeur efficace U, et en déduire la valeur de l'amplitude $\hat{U}$.
2) En déduire $u(t)$ l'expression du signal en fonction de t.
3) Représenter $u(t)$ ainsi que le vecteur de Fresnel associé sur la figure 2.9.

*** Exercice 9 Principe du vectorscope

Un vectorscope est un appareil de mesure permettant de visualiser un signal en fonction d'un autre et d'en déduire la différence de phase entre deux signaux. On peut utiliser par exemple un oscilloscope en mode XY : il affiche alors le signal de la voie 2 en fonction du signal de la voie 1.

Considérons ici un signal audio stéréo composé de deux signaux : $g(t)$ (signal de la voie gauche) et $d(t)$ (signal de la voie droite), présentés respectivement sur les voies 1

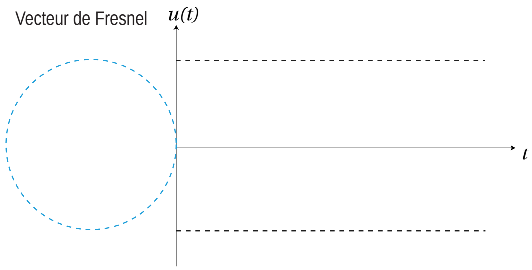
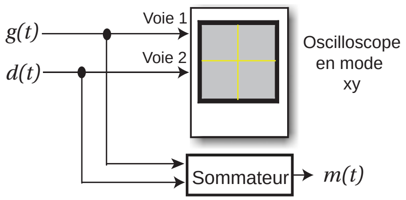


Figure 1.23

et 2 de l'oscilloscope. Un sommateur effectue la somme des deux signaux et délivre en sortie un signal mono $m(t) = g(t) + d(t)$.

Dans cet exercice,

- $g(t)$ et $d(t)$ sont des signaux sinusoïdaux de fréquence $f = 1000\,\text{Hz}$;
- $g(t)$ a une phase nulle à l'origine $\varphi = 0$,
- la sensibilité de l'oscilloscope est de 1 V/div.



1) Dans chaque cas de la figure 1.24 :
   (a) déterminer l'expression de $g(t)$ et $d(t)$;
   (b) déterminer l'expression de $m(t)$;
   (c) tracer la courbe affichée par l'oscilloscope en mode XY pour les signaux $g(t)$ et $d(t)$ présentés temporellement en entrée.

Pour la figure 1.25 :

2) déterminer l'expression de $g(t)$ et $d(t)$;
3) montrer que : $g^2(t) + d^2(t) = 9$;

$g(t)$ et $d(t)$ décrivent alors l'équation d'un cercle paramétré par t.

4) Tracer le cercle sur la figure 1.25.

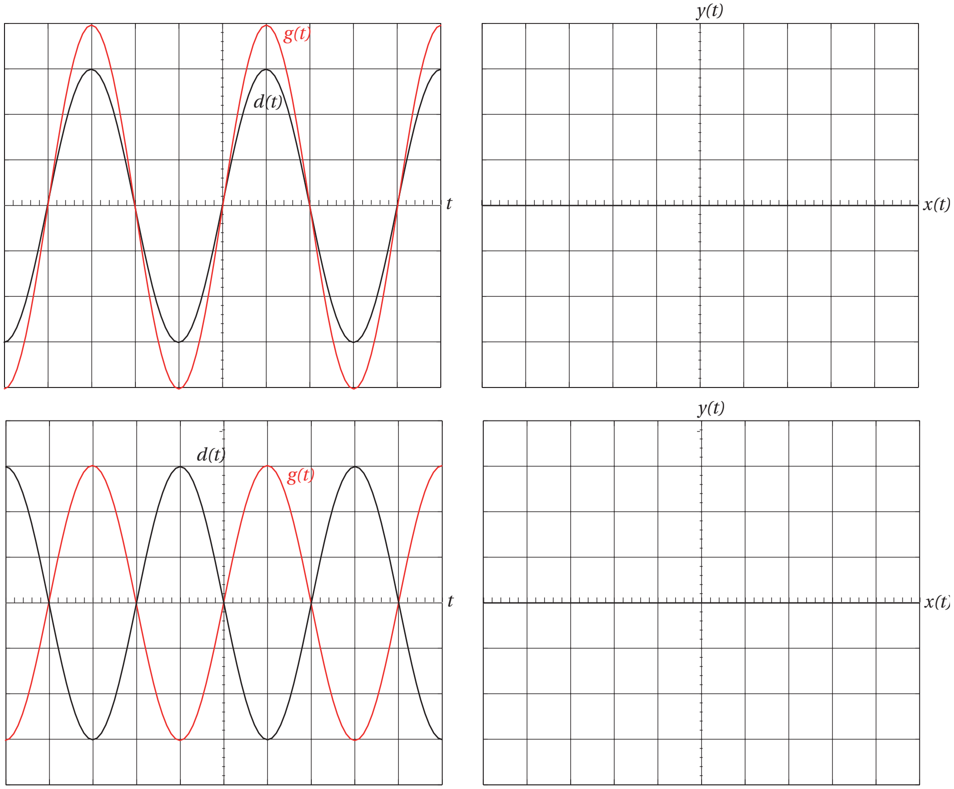


Figure 1.24

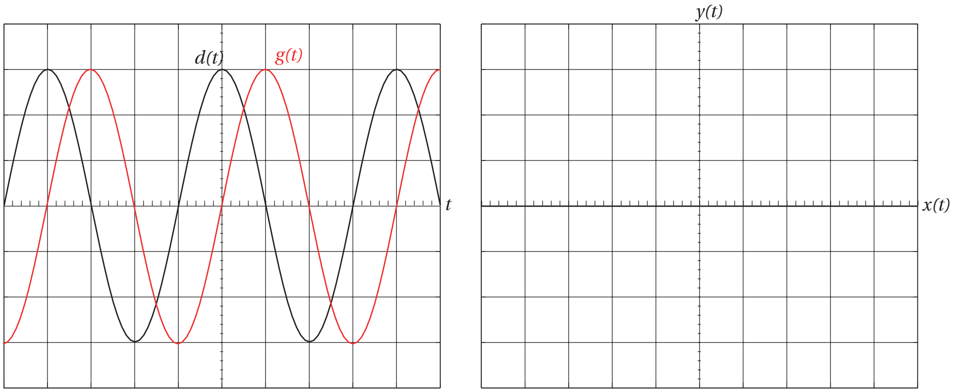


Figure 1.25

Corrigés

Corrigés des QCM

QCM 1

Le signal a une valeur moyenne non nulle, car il n'est pas centré autour de 0. Il peut donc se décomposer en une partie alternative et une partie continue. Il est périodique de fréquence $f = 25\,\text{kHz}$.

QCM 2

$f = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{2\,000\pi}{2\pi} = 1000\,\text{Hz}$, $\varphi = \frac{\pi}{6} \times \frac{180}{\pi} = 30°$, $U = \frac{\hat{U}}{\sqrt{2}} = 2{,}12\,\text{V}$, $L = 20\log\frac{2,12}{0,775} = 8{,}7\,\text{dBu}$

QCM 3

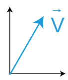
$T = 5\,\text{ms}$, $L = 20\log\frac{1}{1} = 0\text{dBV}$, $\omega = 2\pi f = 2\times\pi\times200 = 1256\,\text{rad}\,\text{s}^{-1}$, $\hat{U} = 1\sqrt{2} = 1{,}41\,\text{V}$

QCM 4

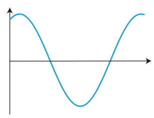
La suite étant aléatoire, le signal n'est donc pas périodique. La probabilité d'avoir $+400\,\text{mV}$ ou $-400\,\text{mV}$ est la même, donc la valeur moyenne $\langle u\rangle = 0$. Le signal est donc alternatif. $\left\langle u^2\right\rangle = (400\,\text{mV})^2$, donc $U = 400\,\text{mV}$.

QCM 5

1) La représentation de Fresnel de cette tension est :



2) Sa représentation temporelle est :

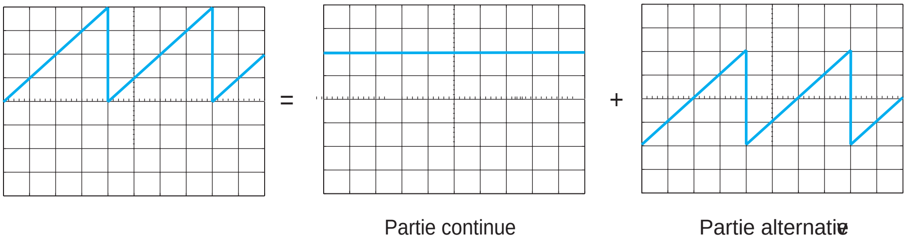


Corrigés des exercices

Exercice 1

1) $T = 4\,\mu\text{s}$, $f = 250\,\text{kHz}$.
2) $U_{\text{max}} = 8\,\text{V}$; $U_{\text{min}} = 0\,\text{V}$.
3) $\langle u\rangle = \frac{\frac{8\times4\times10^{-6}}{2}}{4\times10^{-6}} = 4\,\text{V}$.

4)



Exercice 2

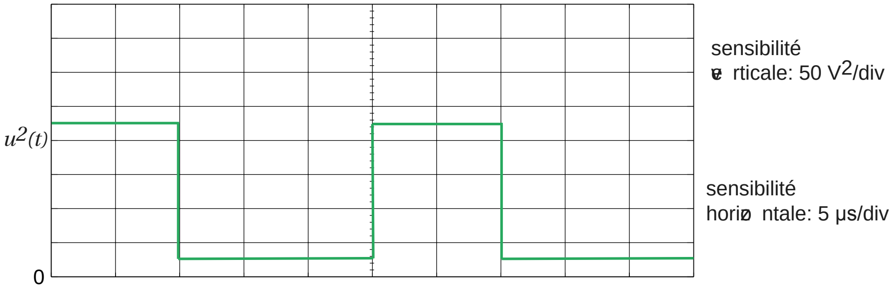


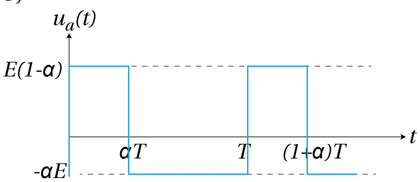
Figure 1.26

1) $T = 25\,\mu\text{s}$; $f = 40\,\text{kHz}$.
2) $U_{\text{max}} = 15\,\text{V}$; $U_{\text{min}} = -5\,\text{V}$.
3) $\langle u \rangle = \dfrac{15 \times 10 \times 10^{-6} - 5 \times 5 \times 10^{-6} + 5 \times 10 \times 10^{-6}}{25 \times 10^{-6}} = 7\,\text{V}$.
4) Voir figure 1.26.
5) $\left\langle u^2 \right\rangle = \dfrac{(15^2 \times 10 \times 10^{-6} + (-5)^2 \times 5 \times 10^{-6} + 5^2 \times 10 \times 10^{-6}}{25 \times 10^{-6}} = 105\,\text{V}^2$, donc :

$$U = \sqrt{105\,\text{V}^2} = 10{,}24\,\text{V}$$

Exercice 3

1) $\langle u \rangle = \dfrac{E \cdot \alpha T + 0 \cdot (1-\alpha)T}{T} = \alpha E$.
2) $\left\langle u^2 \right\rangle = \dfrac{E^2 \cdot \alpha T + 0^2 \cdot (1-\alpha)T}{T} = \alpha E^2$, donc $U = \sqrt{\alpha} \cdot E$.
3)



4) $\left\langle u_a^2 \right\rangle = \dfrac{(E(1-\alpha))^2\,\alpha T + (\alpha E)^2 (1-\alpha) T}{T} = E^2(1-\alpha)^2\alpha + E^2\alpha(1-\alpha) = E^2\alpha(1-\alpha)$, soit $U_a = E\sqrt{\alpha(1-\alpha)}$.

Exercice 4

1) Le signal est numérique car il est discret en temps (échantillonné) et en valeurs (quantifié).

2) $T_e = \dfrac{1}{f_e} = \dfrac{1}{48000} = 20{,}83\,\mu\text{s}$.

3) $\langle u \rangle = \frac{1}{7} \cdot (-2+2-3+2+1-3-4) = -1$.

4) $U = \sqrt{\dfrac{1}{7} \cdot ((-2)^2 + 2^2 + (-3)^2 + 2^2 + 1^2 + (-3)^2 + (-4)^2)} = 2{,}59$.

Exercice 5

1) figure 1.27

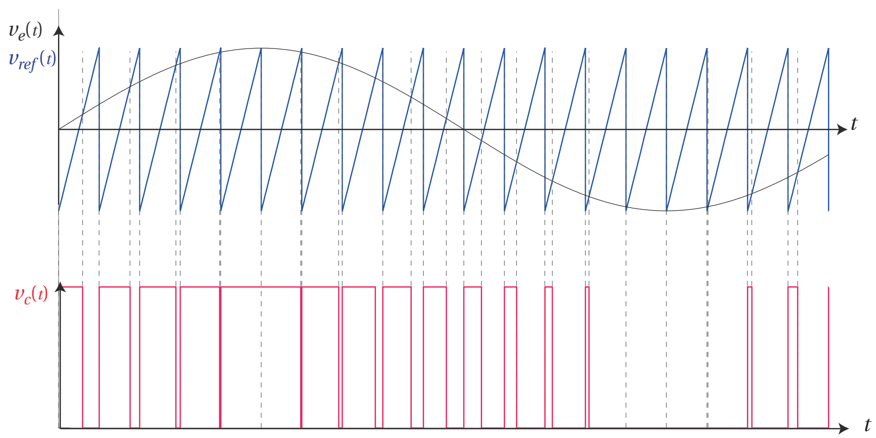


Figure 1.27

2) $v_{\text{ref}}(t)$ et $v_e(t)$ sont des signaux analogiques. $v_c(t)$ est un signal quantifié car il ne peut prendre que 2 valeurs.

> **Remarque**
> En étant mathématiquement rigoureux, il faudrait considérer $v_c(t)$ comme analogique car son oscillogramme est continu entre les 2 valeurs (courbe en trait plein). On considèrera cependant qu'il représente un signal quantifié.

Exercice 6

$\left\langle u^2 \right\rangle = \frac{\hat{u}^2}{T}\int_0^T \sin^2 \omega t\, \mathrm{d}t = \frac{\hat{U}^2}{T}\int_0^T \frac{1-\cos 2\omega t\, dt}{2}\mathrm{d}t = \frac{\hat{U}^2}{T}\left[\frac{t}{2} - \frac{\sin 2\omega t}{2\omega}\right]_0^T$

$\left\langle u^2 \right\rangle = \frac{\hat{U}^2}{T}\left[\left(\frac{T}{2} - \frac{\sin 2\omega T}{2\omega}\right) - \left(\frac{0}{2} - \frac{\sin 2\omega 0}{2\omega}\right)\right] = \frac{\hat{U}^2}{T}\left[\left(\frac{T}{2} - \frac{\sin 4\pi}{2\omega}\right) - 0\right] = \frac{\hat{U}^2}{2}$

Soit $U = \dfrac{\hat{U}}{\sqrt{2}}$

Exercice 7

1) $\hat{U} = 3\,\mathrm{V}$, $T = 20\,\mu\mathrm{s}$, donc $\omega = \dfrac{2\pi}{T} = \dfrac{2\pi}{20.10^{-6}} = 314\,159\,\mathrm{rad\,s^{-1}}$, $3 \times \sin\varphi = 3$, donc $\varphi = \sin^{-1} 1 = \dfrac{\pi}{2}$.

2) On trouve : $u(t) = 3\sin(314159t + \dfrac{\pi}{2})$.

Exercice 8

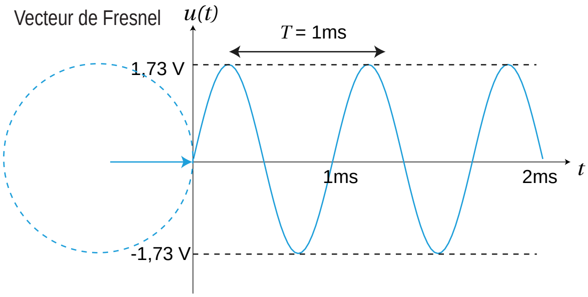


Figure 1.28

1) $L(\mathrm{dBu}) = 20\log(\frac{U}{U_{\mathrm{ref}}}) \Leftrightarrow \log(\frac{U}{U_{\mathrm{ref}}}) = \frac{L(\mathrm{dBu})}{20} \Leftrightarrow \frac{U}{U_{\mathrm{ref}}} = 10^{\frac{L(\mathrm{dBu})}{20}} \Leftrightarrow U = U_{\mathrm{ref}} \cdot 10^{\frac{N(\mathrm{dBu})}{20}}$.
$U = 0,775 \times 10^{\frac{4}{20}} = 1{,}228\,\mathrm{V}$; $\omega = 2\pi \times 1000 = 6283\,\mathrm{rad\,s^{-1}}$; $\hat{U} = 1{,}228 \times \sqrt{2} = 1{,}736\,\mathrm{V}$.

2) $u(t) = 1,736\sin(6\,283\,t)$.

3) Voir figure 2.18

Exercice 9

1) Pour la première partie de la figure 1.24 :

(a) $g(t)$ et $d(t)$ sont en phase. $g(t) = 4\sin(2\,000\pi t)$ et $d(t) = 3\sin(2\,000\pi t)$.

(b) $m(t) = 4\sin(2\,000\pi t) + 3\sin(2\,000\pi t) = 7\sin(2\,000\pi t)$.

(c) Voir la figure 1.29.

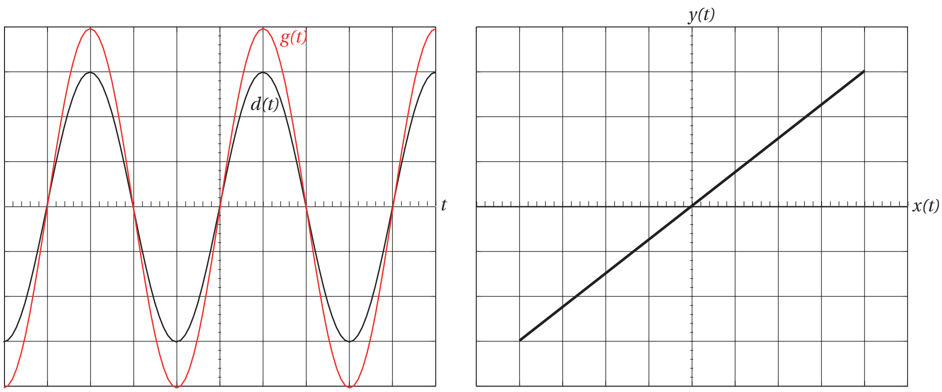


Figure 1.29

Pour la seconde partie de la figure1.24 :

(a) $g(t)$ et $d(t)$ sont en opposition de phase.
$g(t) = 4\sin(2\,000\pi t)$ et $d(t) = 4\sin(2\,000\pi t + \pi) = -4\sin(2\,000\pi t)$.

(b) $m(t) = 0$.

(c) Voir la figure 1.30.

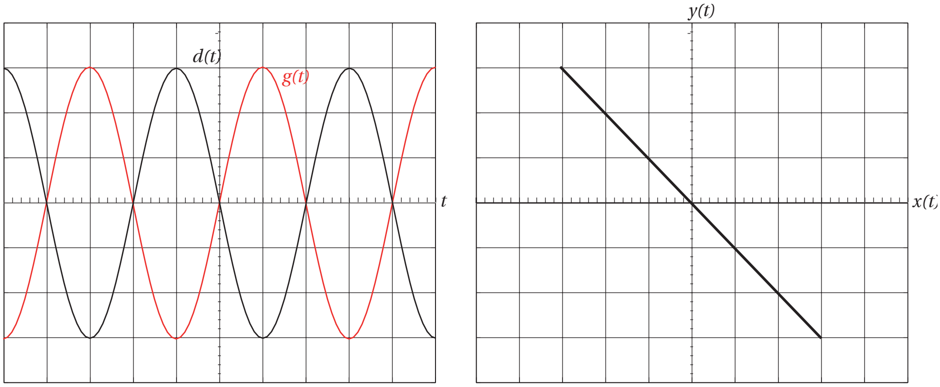


Figure 1.30

2) Pour la figure 1.25 :

(a) $g(t)$ et $d(t)$ sont en quadrature. $g(t) = 4\sin(2\,000\pi t)$ et $d(t) = 4\sin(2\,000\pi t + \frac{\pi}{2})$.

3) $g^2(t) + d^2(t) = (3\sin(2\,000\pi t))^2 + (3\sin(2\,000\pi t + \frac{\pi}{2}))^2$ $g^2(t) + d^2(t) = 9\sin^2(2\,000\pi t) + 9\cos^2(2\,000\pi t) = 9$:

$$g^2(t) + d^2(t) = 9$$

C'est bien l'équation d'un cercle de rayon 3 et de centre O.

4) Voir la figure 1.31.

5)

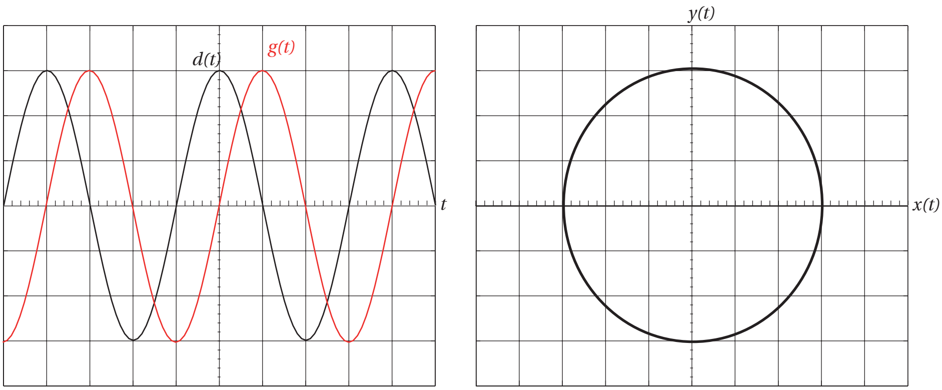


Figure 1.31

Chapitre 2

Analyse fréquentielle des signaux

1. Caractéristiques fréquentielles des signaux périodiques

1.1. Représentation fréquentielle d'un signal sinusoïdal

La représentation temporelle est d'un signal sinusoïdal est l'évolution de son amplitude en fonction du temps. C'est une manière de représenter un signal, que l'on note $u(t)$. Il en existe une autre qui consiste à représenter l'amplitude et la phase à l'origine en fonction des fréquences contenues dans le signal. On la note $U(f)$. C'est une fonction à valeur complexe qui contient deux informations :

- le module $|U(f)|$ est appelé *spectre d'amplitude*. Il s'agit de l'amplitude du signal en fonction de la fréquence ;
- la phase ou $\varphi(f)$, appelée *spectre de phase*. Il s'agit de la phase à l'origine du signal en fonction de la fréquence.

La transformée de Fourier est l'opération mathématique permettant de passer du domaine temporel au domaine fréquentiel. Autrement dit, elle permet de calculer la fonction $U(f)$ à partir de la fonction $u(t)$. Appliquée à un signal sinusoïdal, on obtient pour $|U(f)|$ une raie de hauteur $\hat{U}$ à la fréquence f et pour $\varphi(f)$ une raie de hauteur φ à la fréquence f, comme le montre la figure 2.1. Le signal sinusoïdal est qualifié de pur, car il ne contient qu'une seule fréquence. Dans cet ouvrage on ne représentera que le spectre d'amplitude $|U(f)|$, car il contient l'essentiel des informations sur le signal.

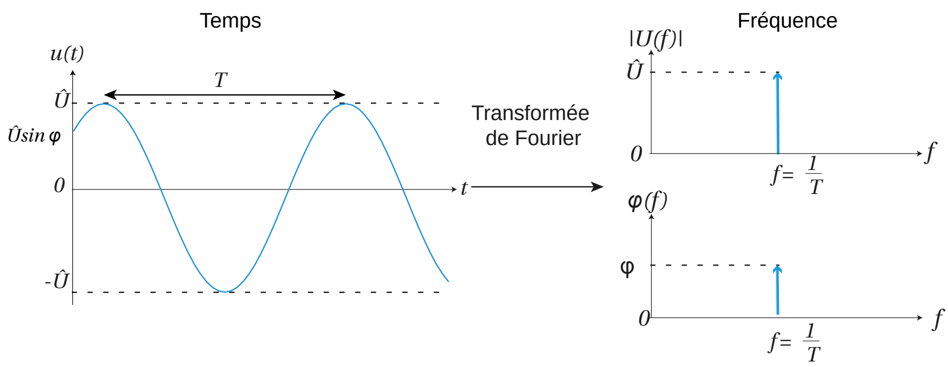


Figure 2.1. Représentation temporelle et fréquentielle d'un signal sinusoïdal

Physique pour l'audiovisuel

Traitement du signal analogique • Acoustique

Consacré au traitement et la transmission des signaux analogiques ainsi qu'à l'acoustique, cet ouvrage constitue le premier des deux volumes destinés principalement aux étudiants du BTS. Le second volume aborde le traitement et à la transmission des signaux numériques, l'optique géométrique, les objectifs de prise de vue, la photométrie, la colorimétrie et la vidéo numérique.

Ils sont conçus pour acquérir les connaissances scientifiques propres aux technologies utilisées en audiovisuel. On trouvera dans chaque chapitre : un **cours complet** ponctué d'applications simples, une **fiche de synthèse** regroupant les principales notions à retenir, des **QCM** et des **exercices** de difficulté croissante. **QCM et exercices sont intégralement corrigés.**

LES PLUS

- **Nombreux extraits de sujets posés à l'épreuve du BTS audiovisuel**
- **Formulaire présentant tous les outils mathématiques nécessaires à la compréhension des thèmes abordés**
- **Index des thermes caractéristiques, permettant une lecture ciblée des thématiques**

Stéphane Gautier est certifié en sciences industrielles de l'ingénieur. Il enseigne dans les classes de BTS audiovisuel au lycée Suger à Saint Denis. Il est l'auteur de nombreux sujets d'examens pour les BTS et les Licences.

Arnaud Margollé est agrégé de physique appliquée. Après avoir enseigné en classes de BTS durant 15 ans, il a rejoint l'Institut supérieur d'électronique de Paris en qualité de professeur. Il est l'auteur du sujet zéro servant de référence pour la nouvelle épreuve d'examen du BTS audiovisuel.

ISBN : 978-2-8073-2750-4

9 782807 327504

Conception graphique : Primo&Primo®

deboeck SUPÉRIEUR

www.deboecksuperieur.com