

Leçon 4 : électronique numérique

E. Capitaine

TSI 2 - Lycée Charles Coëffin

23 septembre 2025

Plan

1 Introduction

2 Numérisation d'un signal

- Notion de signal
- Pourquoi numériser un signal ?
- Structure d'une chaîne d'acquisition et de numérisation

3 Échantillonnage

- Conclusions du TP
- Repliement spectral
- Lien entre études temporelle et spectrale
- Conclusion

Plan

1 Introduction

2 Numérisation d'un signal

- Notion de signal
- Pourquoi numériser un signal ?
- Structure d'une chaîne d'acquisition et de numérisation

3 Échantillonnage

- Conclusions du TP
- Repliement spectral
- Lien entre études temporelle et spectrale
- Conclusion

Introduction

Exemple de recouvrement spectral

Introduction

En quoi la numérisation du signal reçue par la caméra explique-t-elle l'effet observé ?

Plan

1 Introduction

2 Numérisation d'un signal

- Notion de signal
- Pourquoi numériser un signal ?
- Structure d'une chaîne d'acquisition et de numérisation

3 Échantillonnage

- Conclusions du TP
- Repliement spectral
- Lien entre études temporelle et spectrale
- Conclusion

Numérisation d'un signal

Notion de signal

Rappel : un **signal** est

Un signal est dit **analogique** si

Le signal est dit **numérique** si

Numérisation d'un signal

Notion de signal

Rappel : un **signal** est une grandeur $X(t)$ dont la valeur varie et est porteuse d'information.

Un signal est dit **analogique** si

.

Le signal est dit **numérique** si

Numérisation d'un signal

Notion de signal

Rappel : un **signal** est une grandeur $X(t)$ dont la valeur varie et est porteuse d'information.

Un signal est dit **analogique** si la grandeur physique $X(t)$ qui lui est liée peut prendre un ensemble continu de valeurs et est définie sur un intervalle de temps continu.

Le signal est dit **numérique** si

Numérisation d'un signal

Notion de signal

Rappel : un **signal** est une grandeur $X(t)$ dont la valeur varie et est porteuse d'information.

Un signal est dit **analogique** si la grandeur physique $X(t)$ qui lui est liée peut prendre un ensemble continu de valeurs et est définie sur un intervalle de temps continu.

Le signal est dit **numérique** si la grandeur physique prend des valeurs appartenant à un ensemble discret (ou fini) $X_1, X_2, \dots, X_k, X_{k+1}, \dots$ et ne varie qu'à certains instants discrets t_1, t_2, \dots, t_k , etc. Le nombre de valeurs possibles prises par le signal est généralement une puissance de 2.

Numérisation d'un signal

Pourquoi numériser un signal ?

Numérisation d'un signal

Pourquoi numériser un signal ?

- **Pour le stocker** : un signal numérisé représente un ensemble de valeurs fini qu'on peut sauvegarder sur un disque dur par exemple.

Numérisation d'un signal

Pourquoi numériser un signal ?

- **Pour le stocker** : un signal numérisé représente un ensemble de valeurs fini qu'on peut sauvegarder sur un disque dur par exemple.
- **Pour calculer** : il est plus pratique d'effectuer des opérations sur un signal numérique à l'aide d'un programme informatique plutôt que sur un signal analogique avec des circuits électroniques. Exemple : filtre passe-bas numérique.

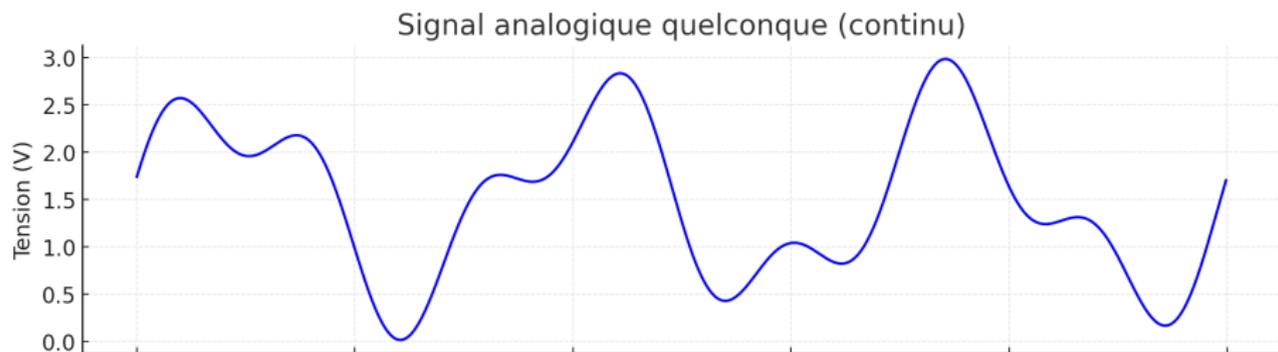
Numérisation d'un signal

Pourquoi numériser un signal ?

- **Pour le stocker** : un signal numérisé représente un ensemble de valeurs fini qu'on peut sauvegarder sur un disque dur par exemple.
- **Pour calculer** : il est plus pratique d'effectuer des opérations sur un signal numérique à l'aide d'un programme informatique plutôt que sur un signal analogique avec des circuits électroniques. Exemple : filtre passe-bas numérique.
- **Pour le transmettre** : comme un signal numérisé varie par valeurs autorisées, il est moins sensible au bruit lors d'une transmission car même en présence de perturbations aléatoires il sera possible de distinguer ces valeurs autorisées.

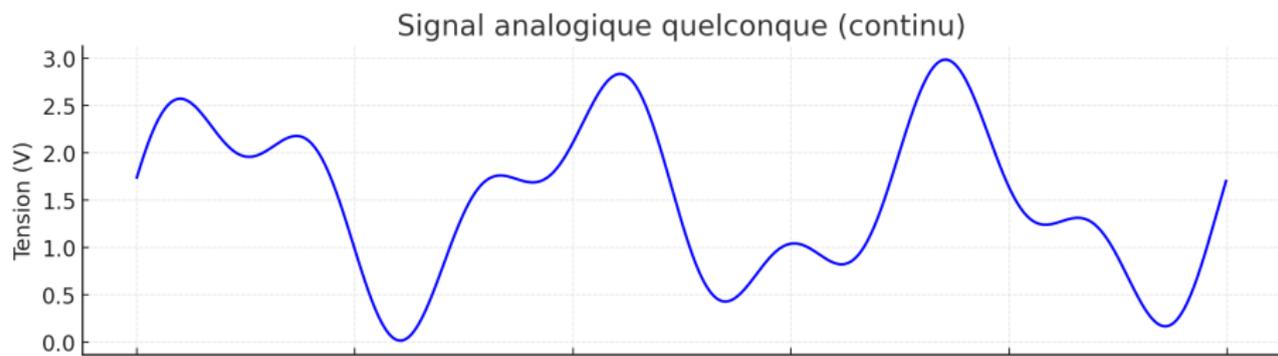
Numérisation d'un signal

Structure d'une chaîne d'acquisition et de numérisation



Numérisation d'un signal

Structure d'une chaîne d'acquisition et de numérisation

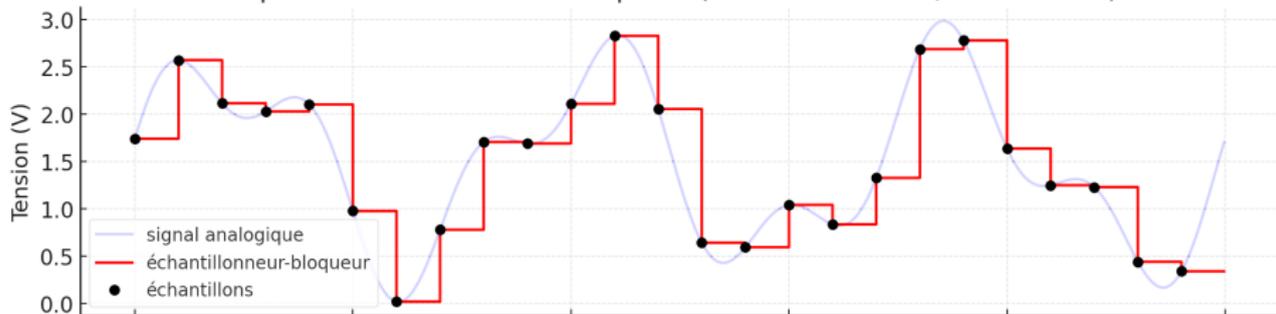


Étape 1 : un signal analogique d'intérêt est d'abord converti en tension analogique par un **transducteur**. Exemple : un microphone converti un signal acoustique en tension, une sonde de température converti une température en tension.

Numérisation d'un signal

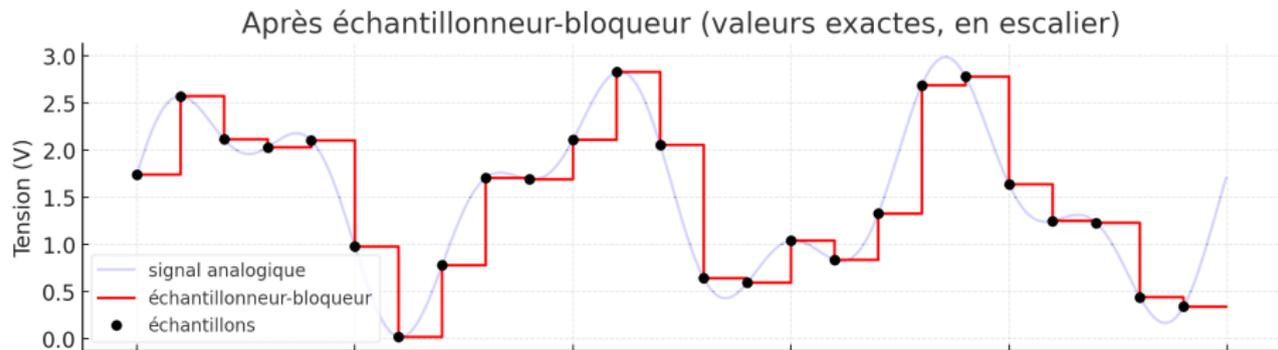
Structure d'une chaîne d'acquisition et de numérisation

Après échantillonneur-bloqueur (valeurs exactes, en escalier)



Numérisation d'un signal

Structure d'une chaîne d'acquisition et de numérisation

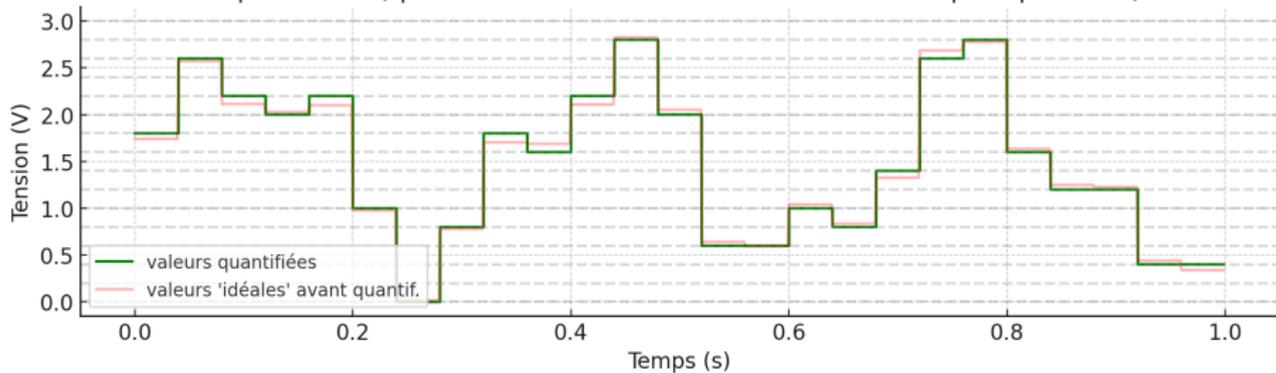


Étape 2 : la tension analogique est envoyée vers un **échantillonneur bloqueur**. À l'instant initial t_0 ce dernier lit la valeur du signal de tension reçu et la bloque jusqu'à l'instant $t_0 + T_e$, avec T_e la période d'échantillonnage ; puis il lit la nouvelle valeur de tension à l'instant $t_0 + T_e$ et la bloque jusqu'à l'instant $t_0 + 2T_e$. L'opération recommence jusqu'à la fin du signal. T_e est appelé **période d'échantillonnage**.

Numérisation d'un signal

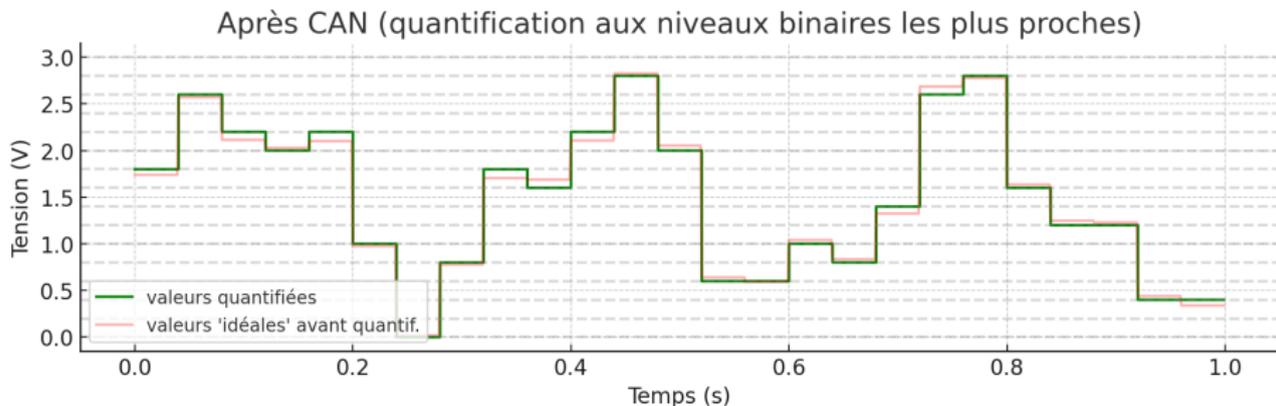
Structure d'une chaîne d'acquisition et de numérisation

Après CAN (quantification aux niveaux binaires les plus proches)



Numérisation d'un signal

Structure d'une chaîne d'acquisition et de numérisation

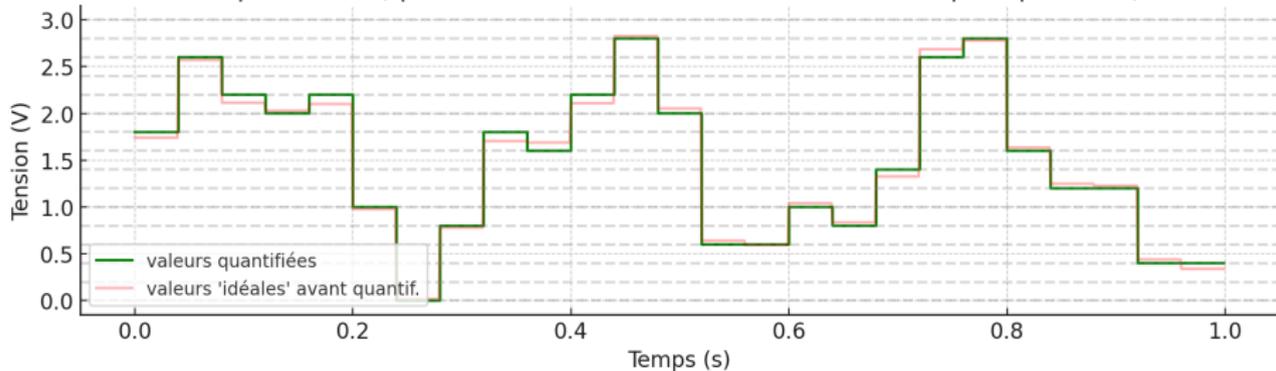


Étape 3 : en sortie de l'échantillonneur bloqueur la tension est encore analogique : on connaît sa valeur à toute instant t et toutes les valeurs de tension sont permises. Un **convertisseur analogique numérique** (CAN) attribue alors à la valeur de tension lue une valeur binaire, souvent la plus proche de la valeur réelle.

Numérisation d'un signal

Structure d'une chaîne d'acquisition et de numérisation

Après CAN (quantification aux niveaux binaires les plus proches)



Étape 4 : les couples de valeurs, temps et tensions, issues du CAN sont finalement **stockées en mémoire** pour être affichées ou manipulées.

Numérisation d'un signal

Structure d'une chaîne d'acquisition et de numérisation

Le **pas de quantification** q d'un CAN d'une résolution de N bits pouvant mesurer des signaux de V_{min} à V_{max} est

$$q = \frac{V_{max} - V_{min}}{2^N - 1}$$

car il y a 2^N valeurs disponibles séparées par $2^N - 1$ intervalles.

Plan

1 Introduction

2 Numérisation d'un signal

- Notion de signal
- Pourquoi numériser un signal ?
- Structure d'une chaîne d'acquisition et de numérisation

3 Échantillonnage

- Conclusions du TP
- Repliement spectral
- Lien entre études temporelle et spectrale
- Conclusion

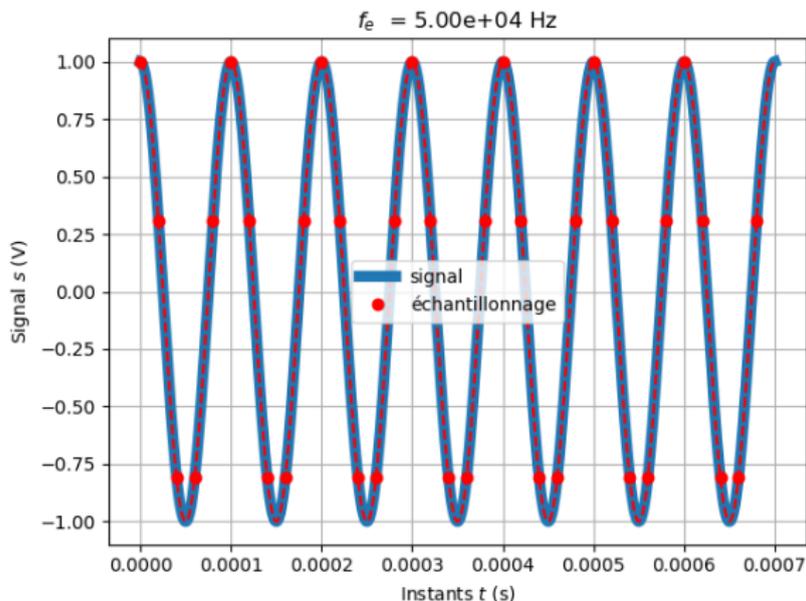
Échantillonnage

Conclusions du TP

Afin d'échantillonner un signal de fréquence f (ici égale à 10 kHz) il faut respecter une condition sur la fréquence d'échantillonnage f_e .

Échantillonnage

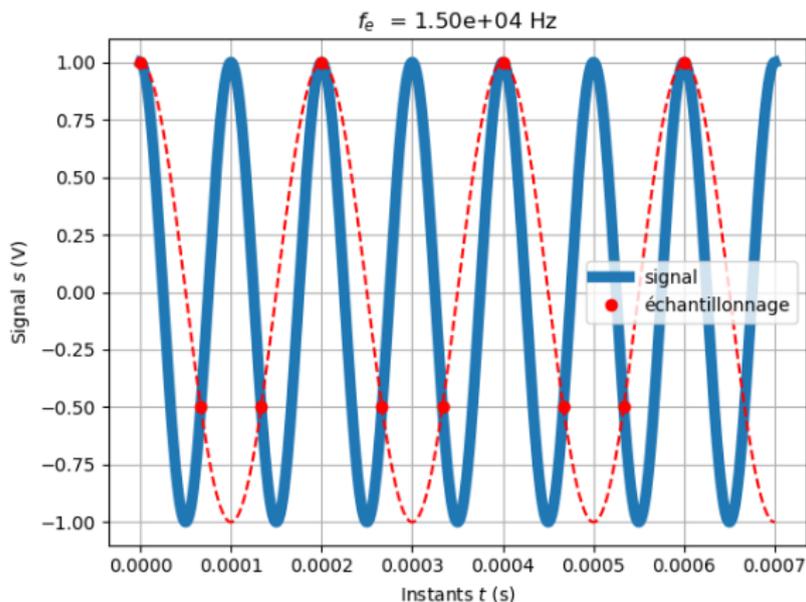
Conclusions du TP



Lorsque la fréquence maximale contenue dans le signal f est inférieure à $f_e/2$ alors on a un bon échantillonnage : **il y a assez de points pour retrouver le signal de départ.**

Échantillonnage

Conclusions du TP



Lorsque la fréquence maximale contenue dans le signal f est supérieure à $f_e/2$ alors on a un mauvais échantillonnage : **il n'y a assez de points pour retrouver le signal de départ, on obtient un signal de fréquence $f_e - f$.**

Échantillonnage

Conclusions du TP

Critère de Nyquist-Shannon : $f < \frac{f_e}{2}$.

Échantillonnage

Conclusions du TP

Critère de Nyquist-Shannon : $f < \frac{f_e}{2}$.

On peut le voir aussi de manière temporelle

$$\frac{1}{T} < \frac{1}{2T_e} \quad ; \quad T > 2T_e \quad ; \quad \frac{T}{T_e} > 2.$$

Échantillonnage

Conclusions du TP

Critère de Nyquist-Shannon : $f < \frac{f_e}{2}$.

On peut le voir aussi de manière temporelle

$$\frac{1}{T} < \frac{1}{2T_e} \quad ; \quad T > 2T_e \quad ; \quad \frac{T}{T_e} > 2.$$

Le nombre d'échantillons par période $\frac{T}{T_e}$ doit donc être supérieur à 2 pour que l'on puisse reconstituer le signal (avec T la période du signal).

Échantillonnage

Conclusions du TP

Critère de Nyquist-Shannon : $f < \frac{f_e}{2}$.

On peut le voir aussi de manière temporelle

$$\frac{1}{T} < \frac{1}{2T_e} \quad ; \quad T > 2T_e \quad ; \quad \frac{T}{T_e} > 2.$$

Le nombre d'échantillons par période $\frac{T}{T_e}$ doit donc être supérieur à 2 pour que l'on puisse reconstituer le signal (avec T la période du signal).

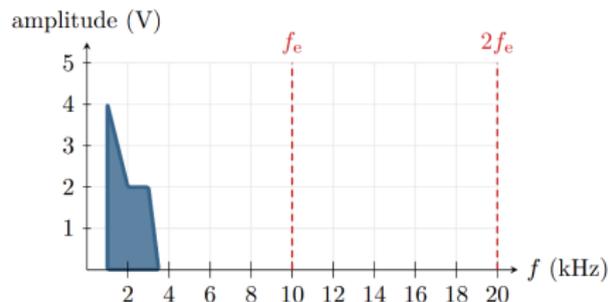
À ne pas confondre avec **le nombre d'échantillons de tout l'échantillonnage** N_a qui est liée à la durée total du signal T_a :

$$T_a = N_a T_e = \frac{N_a}{f_e}.$$

Échantillonnage

Repliement spectral

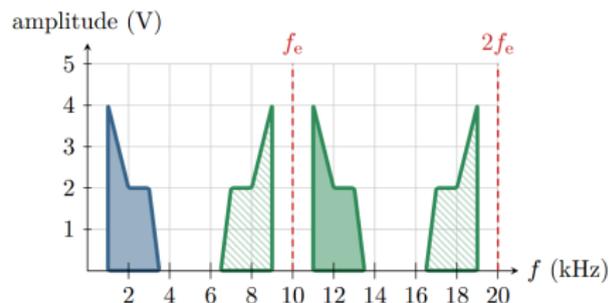
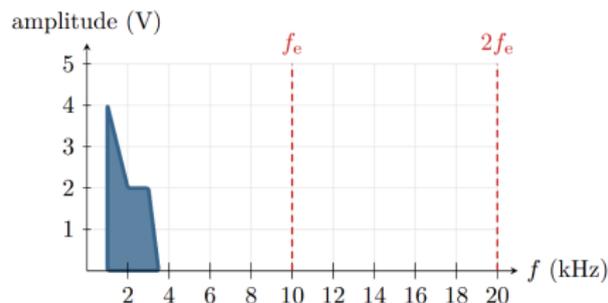
Pourquoi doit-on respecter le critère de Nyquist-Shannon ?



Échantillonnage

Repliement spectral

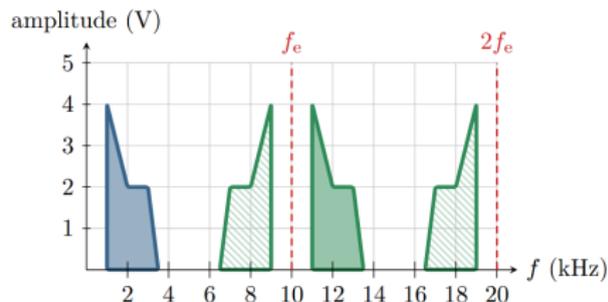
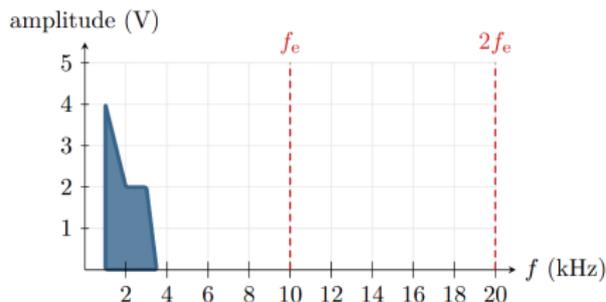
Pourquoi doit-on respecter le critère de Nyquist-Shannon ? Car lorsqu'on échantillonne un signal de fréquence f avec une fréquence d'échantillonnage f_e , il apparaît dans le signal échantillonné de nouvelles fréquences $f_e - f$ et $f_e + f$.



Échantillonnage

Repliement spectral

Pourquoi doit-on respecter le critère de Nyquist-Shannon ? Car lorsqu'on échantillonne un signal de fréquence f avec une fréquence d'échantillonnage f_e , il apparaît dans le signal échantillonné de nouvelles fréquences $f_e - f$ et $f_e + f$.

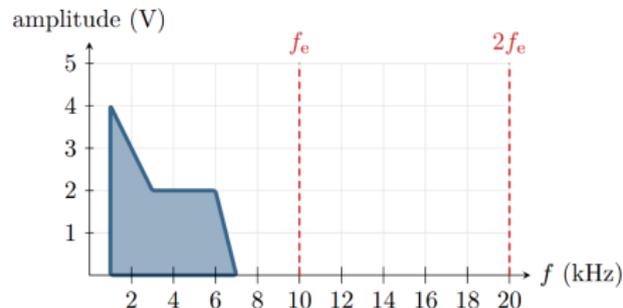


Si le critère de Nyquist-Shannon est respecté (la fréquence maximale du signal est inférieure à $f_e/2$) alors le signal en bleu n'est pas impacté et on peut supprimer les fréquences $f_e - f$ et $f_e + f$ à l'aide d'un filtre passe-bas de fréquence de coupure $f_e/2$.

Échantillonnage

Repliement spectral

Pourquoi doit-on respecter le critère de Nyquist-Shannon ? Car lorsqu'on échantillonne un signal de fréquence f avec une fréquence d'échantillonnage f_e , il apparaît dans le signal échantillonné de nouvelles fréquences $f_e - f$ et $f_e + f$.

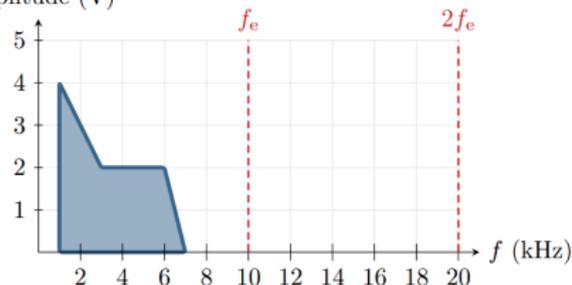


Échantillonnage

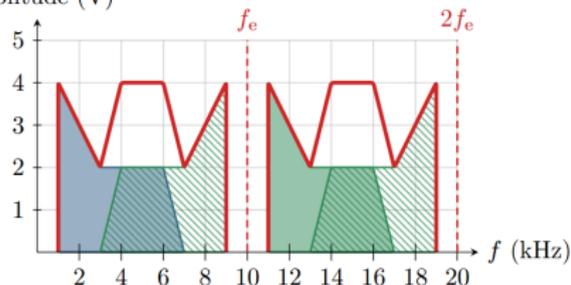
Repliement spectral

Pourquoi doit-on respecter le critère de Nyquist-Shannon ? Car lorsqu'on échantillonne un signal de fréquence f avec une fréquence d'échantillonnage f_e , il apparaît dans le signal échantillonné de nouvelles fréquences $f_e - f$ et $f_e + f$.

amplitude (V)



amplitude (V)



Si le critère de Nyquist-Shannon n'est pas respecté alors le signal en bleu est impacté et par les fréquences $f_e - f$: **il y a repliement spectral**, le signal est brouillé, on perd l'information et on ne peut pas utiliser de filtre-passe bas de fréquence de coupure $f_e/2$.

Échantillonnage

Lien entre études temporelle et spectrale

Lorsque l'on réalise un échantillonnage d'une durée T_a avec une période d'échantillonnage T_e , le spectre que l'on obtient a une résolution spectrale Δf et une largeur qui s'étend jusqu'à f_{max} telles que

$$\Delta f = \frac{1}{T_a} \quad \text{et} \quad f_{max} = \frac{1}{T_e} = f_e.$$

Le nombre de valeurs de fréquences représentables sur le spectre est

Échantillonnage

Lien entre études temporelle et spectrale

Lorsque l'on réalise un échantillonnage d'une durée T_a avec une période d'échantillonnage T_e , le spectre que l'on obtient a une résolution spectrale Δf et une largeur qui s'étend jusqu'à f_{max} telles que

$$\Delta f = \frac{1}{T_a} \quad \text{et} \quad f_{max} = \frac{1}{T_e} = f_e.$$

Le nombre de valeurs de fréquences représentables sur le spectre est $N_f = f_e / \Delta f = \frac{T_a}{T_e} = N_a$, soit le nombre d'échantillons mesurés.

Échantillonnage

Que pouvez-vous conclure quant à la vidéo de l'hélicoptère ?

Échantillonnage

Que pouvez-vous conclure quant à la vidéo de l'hélicoptère ?

Indice : cela explique aussi pourquoi on voit parfois des roues de voitures “tourner” en sens inverse sur certaines vidéos.