

Leçon 4 : électronique numérique

E. Capitaine

TSI 2 - Lycée Charles Coëffin

23 septembre 2026

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

- Expérience en direct
- 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

- Expérience en direct
- Repliement spectral
- Lien entre études temporelle et spectrale
- Conclusion

Introduction

Exemple de recouvrement spectral

► Lire la vidéo

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

- Expérience en direct
- 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** s'il

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** s'il

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** s'il

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** s'il est une représentation d'un signal par une suite de valeurs numériques $X_1, X_2, \dots, X_k, X_{k+1}, \dots$ prises à des instants discrets $t_1, t_2, \dots, t_k, t_{k+1}, \dots$ et appartenant à un ensemble fini de valeurs possibles.

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

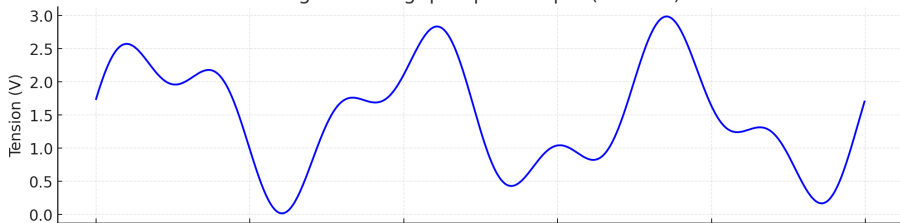
Pourquoi numériser un signal ?

- **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

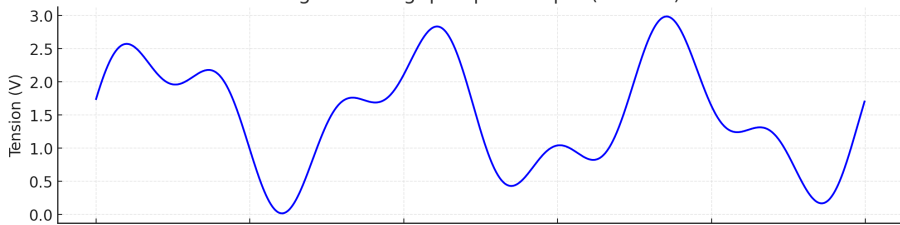
Signal analogique quelconque (continu)



Numérisation d'un signal

Structure d'une chaîne d'acquisition et de numérisation

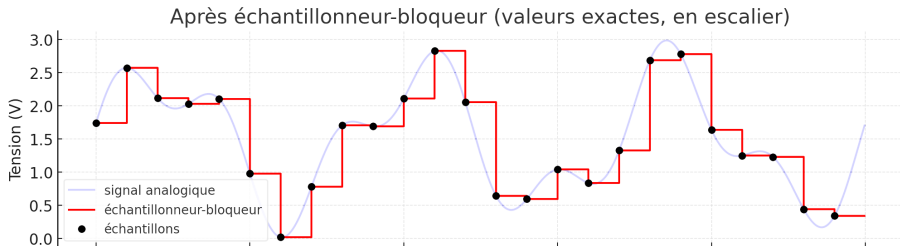
Signal analogique quelconque (continu)



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.

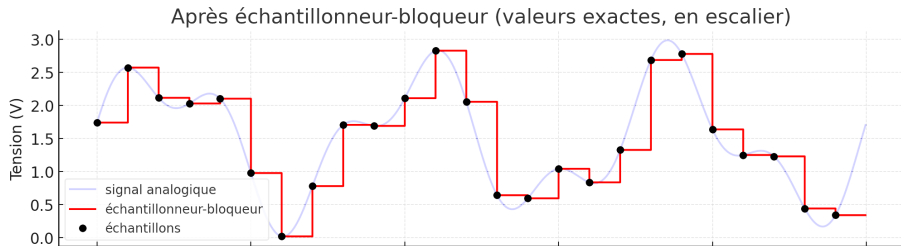
Numérisation d'un signal

Structure d'une chaîne d'acquisition et de numérisation



Numérisation d'un signal

Structure d'une chaîne d'acquisition et de numérisation

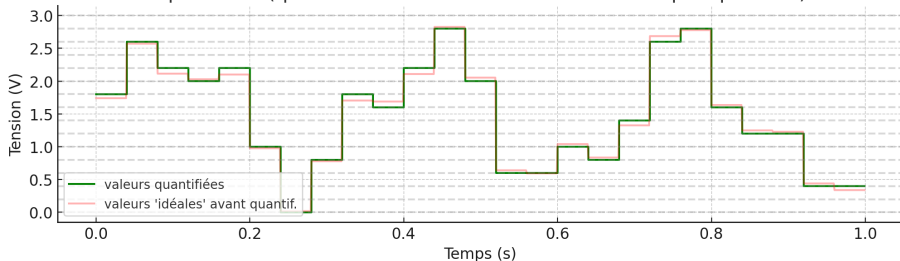


Étape 2 : la tension analogique est envoyée vers un **échantillonneur bloqueur**. À l'instant initial t_0 ce dernier lit la valeur du signal de tension reçu et la bloque jusqu'à l'instant $t_0 + T_e$, avec T_e la période d'échantillonnage ; puis il lit la nouvelle valeur de tension à l'instant $t_0 +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

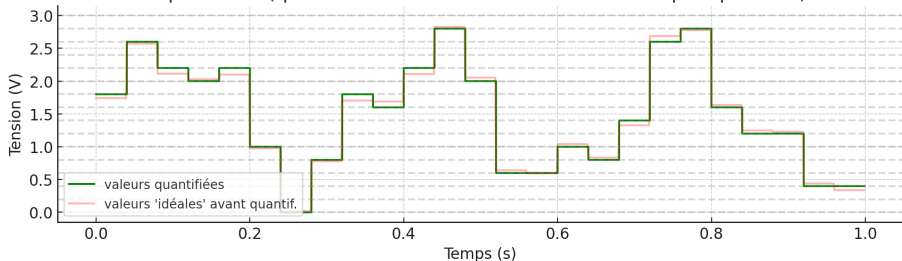
Après CAN (quantification aux niveaux binaires les plus proches)



Numérisation d'un signal

Structure d'une chaîne d'acquisition et de numérisation

Après CAN (quantification aux niveaux binaires les plus proches)



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) associe à la tension d'entrée l'un des 2^N niveaux de quantification disponibles. Dans le modèle d'une quantification au plus proche, le niveau retenu est celui dont la valeur de tension associée est la plus proche de la tension d'entrée. À ce niveau est associé un code binaire sur N bits.

◀ ◻ ▶ ◀ ◻ ▶ ◀ ≡ ▶ ◀ ≡ ▶ ≡

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

- Expérience en direct
- Repliement spectral
- Lien entre études temporelle et spectrale
- Conclusion

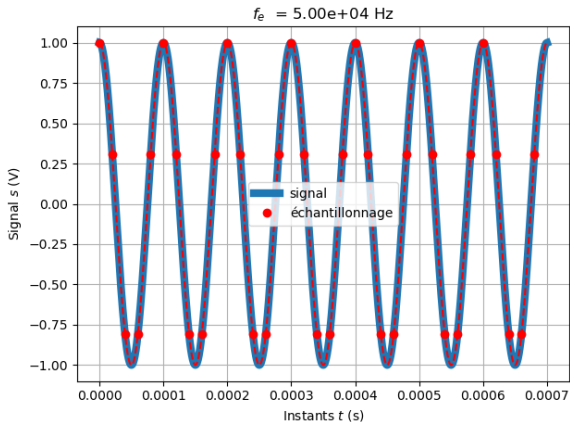
Échantillonnage

Expérience en direct

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

Échantillonnage

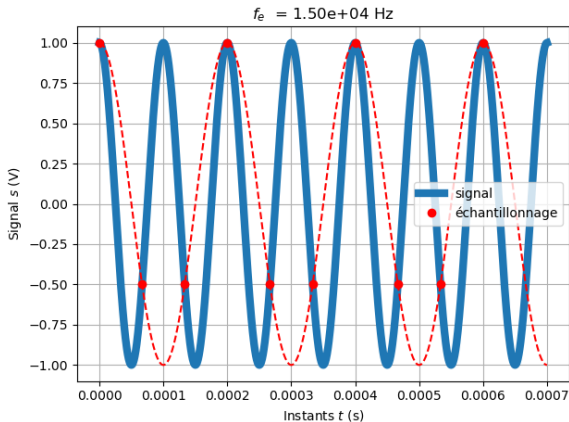
Expérience en direct



Lorsque la fréquence d'échantillonnage f_e est supérieure à $2f$ alors on a un bon échantillonnage : **il y a assez de points pour retrouver le signal de départ.**

Échantillonnage

Expérience en direct



Lorsque la fréquence d'échantillonnage f_e est inférieure à $2f$ 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

Expérience en direct

On généralise le critère d'échantillonnage précédent à tout signaux ayant une fréquence maximale $f_{\max}$, c'est ce qu'on nomme le **critère de Nyquist-Shannon** : $f_{\max} < \frac{f_e}{2}$.

Échantillonnage

Expérience en direct

On généralise le critère d'échantillonnage précédent à tout signaux ayant une fréquence maximale $f_{\max}$, c'est ce qu'on nomme le **critère de Nyquist-Shannon** : $f_{\max} < \frac{f_e}{2}$.

On peut le voir aussi de manière temporelle

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

Échantillonnage

Expérience en direct

On généralise le critère d'échantillonnage précédent à tout signaux ayant une fréquence maximale $f_{\max}$, c'est ce qu'on nomme le **critère de Nyquist-Shannon** : $f_{\max} < \frac{f_e}{2}$.

On peut le voir aussi de manière temporelle

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

Pour un signal sinusoïdal, 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

Expérience en direct

On généralise le critère d'échantillonnage précédent à tout signaux ayant une fréquence maximale $f_{\max}$, c'est ce qu'on nomme le **critère de Nyquist-Shannon** : $f_{\max} < \frac{f_e}{2}$.

On peut le voir aussi de manière temporelle

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

Pour un signal sinusoïdal, 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).

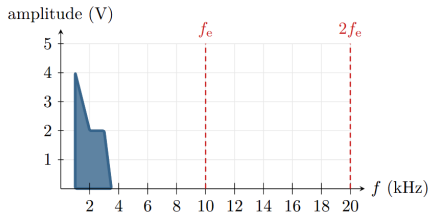
À ne pas confondre avec le **nombre d'échantillons de tout l'échantillonnage** N_a qui est liée à la durée total du signal T_a :

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

Échantillonnage

Repliement spectral

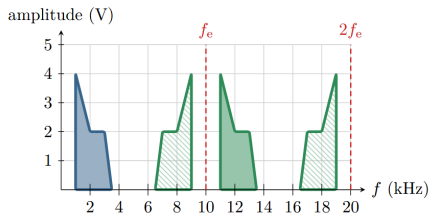
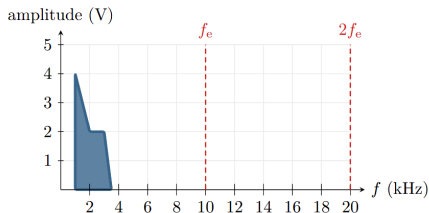
Pourquoi doit-on respecter le critère de Nyquist-Shannon ?



Échantillonnage

Repliement spectral

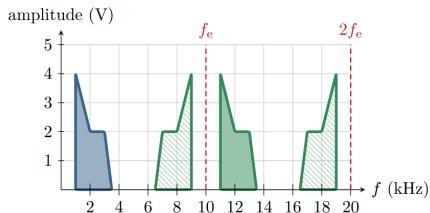
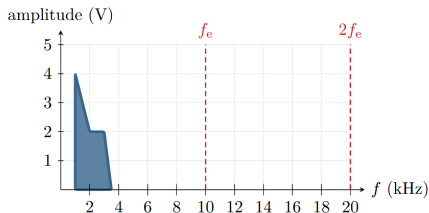
Pourquoi doit-on respecter le critère de Nyquist-Shannon ? Car l'échantillonnage crée des copies du spectre du signal centrées autour de kf_e avec $k \in \mathbb{N}$. Il apparaît de **nouvelles composantes**, des artefacts dûs à l'échantillonnage, de fréquences $|kf_e \pm f|$.



Échantillonnage

Repliement spectral

Pourquoi doit-on respecter le critère de Nyquist-Shannon ? Car l'échantillonnage crée des copies du spectre du signal centrées autour de kf_e avec $k \in \mathbb{N}$. Il apparaît de **nouvelles composantes**, des artefacts dûs à l'échantillonnage, de fréquences $|kf_e \pm f|$.

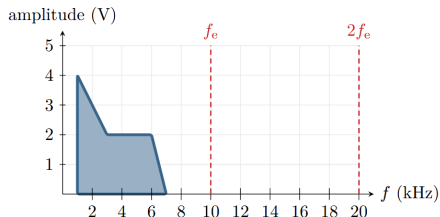


Si le critère de Nyquist-Shannon est respecté (la fréquence maximale du signal est inférieure à $f_e/2$) alors le signal en bleu n'est pas impacté et on peut supprimer les fréquences $|kf_e \pm f|$ à l'aide d'un **filtre de reconstruction** : un premier filtre passe-bas de fréquence de coupure $f_e/2$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

Échantillonnage

Repliement spectral

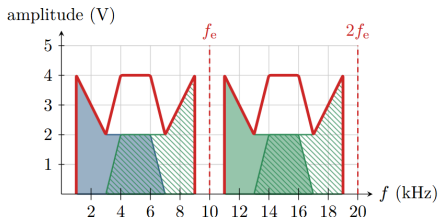
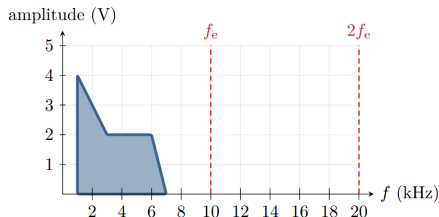
Pourquoi doit-on respecter le critère de Nyquist-Shannon ? Car l'échantillonnage crée des copies du spectre du signal centrées autour de kf_e avec $k \in \mathbb{N}$. Il apparaît de **nouvelles composantes**, des artefacts dûs à l'échantillonnage, de fréquences $|kf_e \pm f|$.



Échantillonnage

Repliement spectral

Pourquoi doit-on respecter le critère de Nyquist-Shannon ? Car l'échantillonnage crée des copies du spectre du signal centrées autour de kf_e avec $k \in \mathbb{N}$. Il apparaît de **nouvelles composantes**, des artefacts dûs à l'échantillonnage, de fréquences $|kf_e \pm f|$.

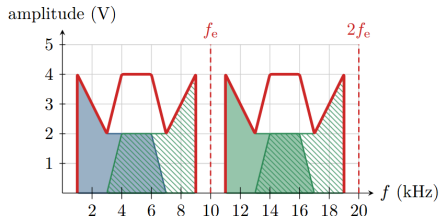
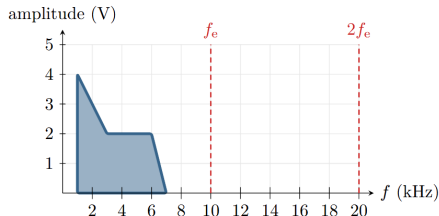


Si le critère de Nyquist-Shannon n'est pas respecté alors le signal en bleu est impacté et par les fréquences $f_e - f$: **il y a repliement spectral**, le signal est brouillé, on perd l'information et on ne peut pas utiliser de filtre-passe bas de fréquence de coupure $f_e/2$.

Échantillonnage

Repliement spectral

Pourquoi doit-on respecter le critère de Nyquist-Shannon ? Car l'échantillonnage crée des copies du spectre du signal centrées autour de kf_e avec $k \in \mathbb{N}$. Il apparaît de **nouvelles composantes**, des artefacts dûs à l'échantillonnage, de fréquences $|kf_e \pm f|$.



Pour éviter le repliement spectral, on peut utiliser **un filtre anti-repliement** avant l'échantillonnage par l'échantillonneur bloqueur : un deuxième filtre passe-bas de fréquence de coupure correspondant à $f_e/2$ qui réduira les composantes de fréquences f ne respectant pas $f < \frac{f_e}{2}$.

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 spectrale qui s'étend jusqu'à $f_{\text{Nyquist, max}}$ telles que

$$\Delta f = \frac{1}{T_a} \quad \text{et} \quad f_{\text{Nyquist, max}} = \frac{f_e}{2} = \frac{1}{2T_e}.$$

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 spectrale qui s'étend jusqu'à $f_{\text{Nyquist, max}}$ telles que

$$\Delta f = \frac{1}{T_a} \quad \text{et} \quad f_{\text{Nyquist, max}} = \frac{f_e}{2} = \frac{1}{2T_e}.$$

Le nombre de valeurs de fréquences représentables sur le spectre est $N_f = f_e / \Delta f = \frac{T_a}{2T_e} = \frac{N_a}{2}$, soit la moitié du 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.