

# L3 ESPM - Métrologie

## FPS620BM

Cours I – 2 heures

[frank.buloup@univ-amu.fr](mailto:frank.buloup@univ-amu.fr)

[julien.serres@univ-amu.fr](mailto:julien.serres@univ-amu.fr)



INSTITUT ///////////////  
DES SCIENCES ETIENNE  
DU MOUVEMENT JULES  
//////////////////// MAREY

# Présentation du module de 20h

**Divisé en dix séances de deux heures chacune :**

**Cf. fiche de cours su AMETICE**

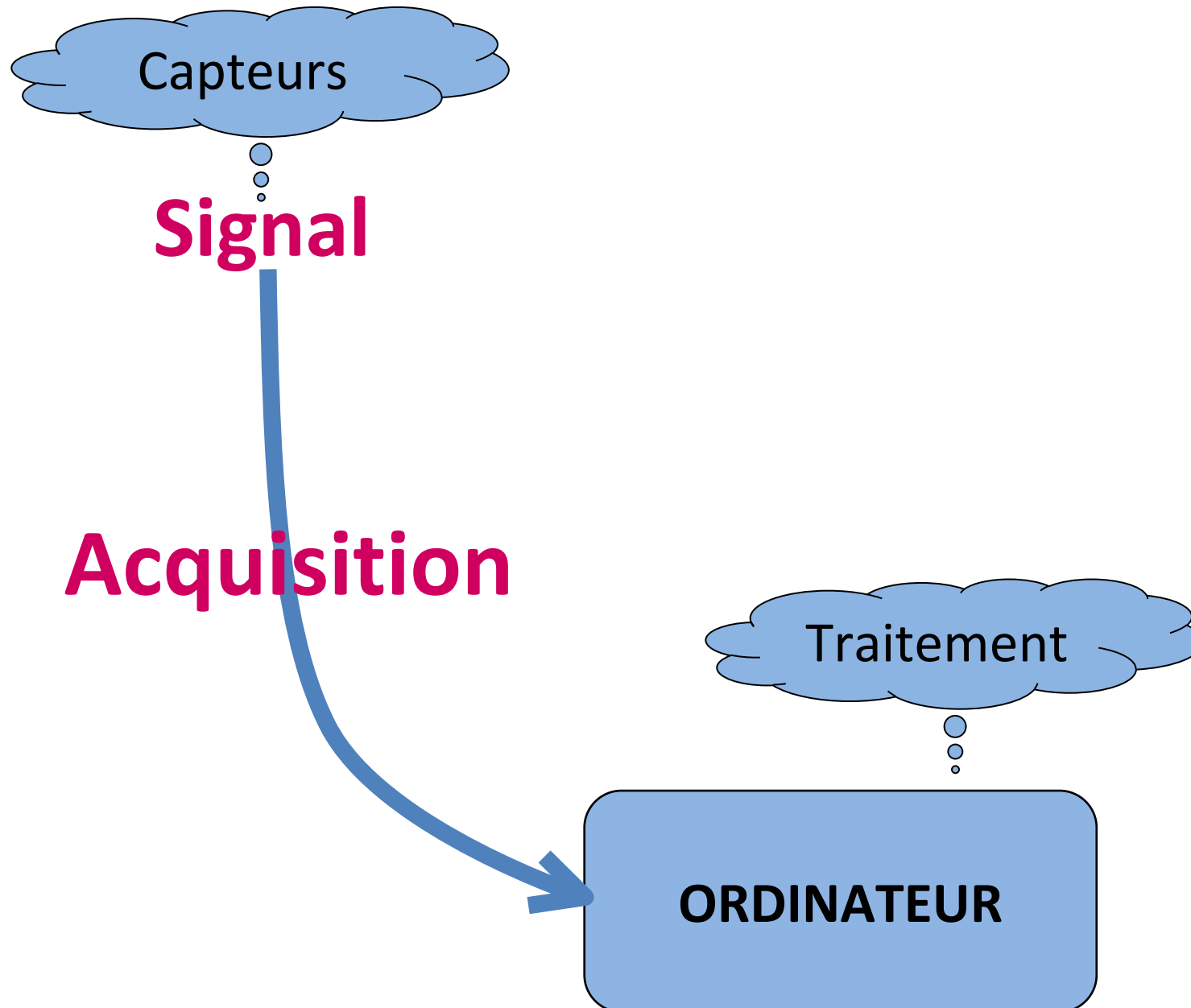
**Une séance de contrôle final d'une heure**

**CC1 (25% - )CC APP (50%) et CF écrit une heure (50%)**

**À l'issue de de cette formation vous serez capable de :**

- Identifier et décrire les différents éléments qui composent une chaine d'acquisition de données
  1. Énumérer les concepts relatifs à la métrologie, aux capteurs
  2. Décrire l'opération de conversion analogique vers numériques
- Utiliser les traitements de base en calcul numérique
  1. Mettre en œuvre les calculs de moyenne et d'écart type
  2. Utiliser une filtre numérique
- Appliquer les grands principes de la compatibilité électromagnétique
  1. Décrire les différentes perturbations des électroniques
  2. Connaître les techniques à mettre en œuvre pour diminuer ces perturbations

# Présentation, objectifs



## Première partie – Signal, notions de métrologie, acquisition

- a) Présentation du concept de Signal**
- b) Notions de métrologie – Capteur**
- c) Du monde analogique au monde numérique : le composant**
- d) Les différentes étapes de cette conversion et le théorème de Shannon-Nyquist**
- e) Les caractéristiques essentielles de la Conversion Analogique/Numérique**

# Un signal ?

## Domaine

Ingénierie électrique

## Définition

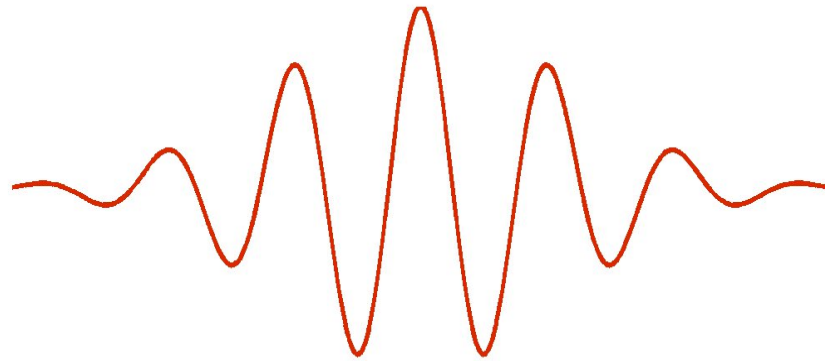
Manifestation d'un **phénomène physique**  
**observable électriquement**



# Un signal ?

Quelle est la grandeur électrique associée ?

Le signal délivré par un capteur est généralement une **tension analogique**

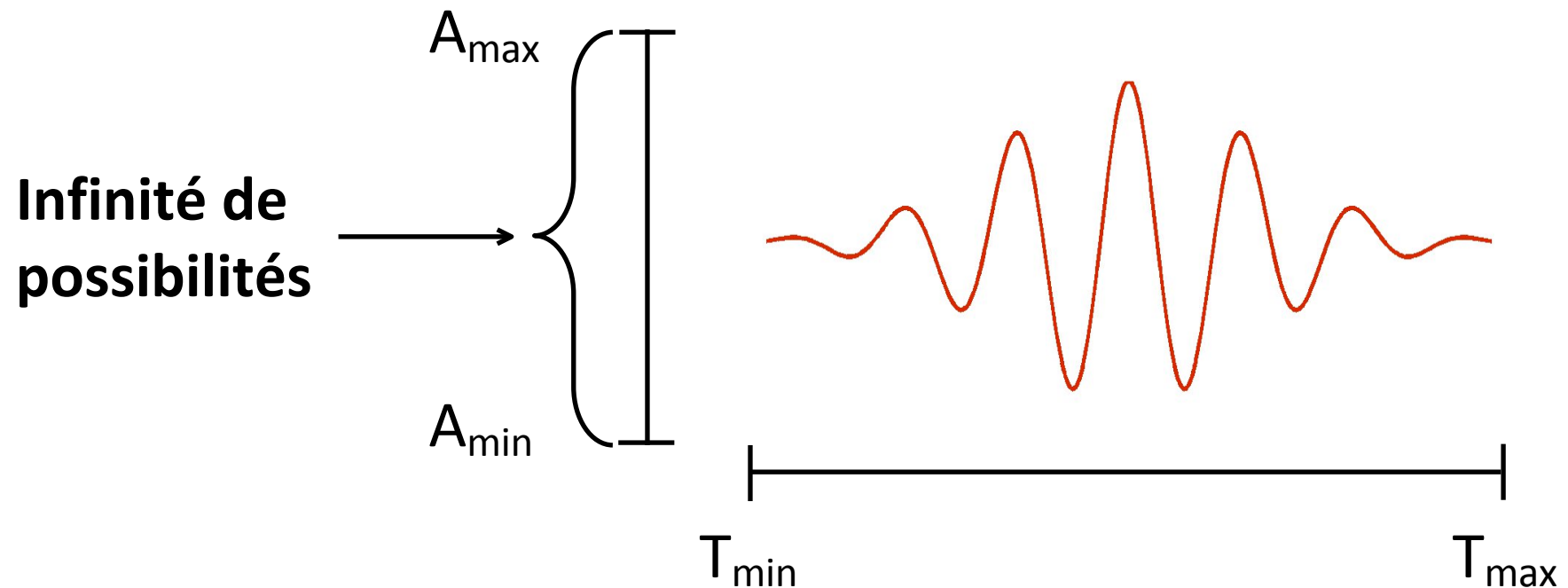


**Signal continu à temps continu = signal analogique**

# Un signal ?

## Qu'est-ce qu'un signal analogique ?

**Le support d'une information qui peut, à tout instant d'un intervalle de temps donné, prendre toute valeur dans un intervalle d'amplitude donné**





## Première partie – Signal, notions de métrologie, acquisition

- a) Présentation du concept de Signal
- b) Notions de métrologie – Capteur**
- c) Du monde analogique au monde numérique : le composant
- d) Les différentes étapes de cette conversion et le théorème de Shannon-Nyquist
- e) Les caractéristiques essentielles de la Conversion Analogique/Numérique

## Mesurande

Grandeur physique que l'on veut mesurer



## Mesurande

**Grandeur physique que l'on veut mesurer**



## Capteur

**Dispositif de mesure permettant de transformer un mesurande en une grandeur utilisable expérimentalement**



A VOUS !

**Connaissez-vous d'autres mesurandes  
et leurs capteurs associés ?**

Mesurande	Capteur



A VOUS !

**Connaissez-vous d'autres mesurandes  
et leurs capteurs associés ?**

Mesurande	Capteur
Position (m, rad)	
Vitesse (m.s <sup>-1</sup> , rad.s <sup>-1</sup> )	
Accélération (m.s <sup>-2</sup> , rad.s <sup>-2</sup> )	
Force (N)	
Flux lumineux (Lux)	
Déformation (m)	



A VOUS !

## Connaissez-vous d'autres mesurandes et leurs capteurs associés ?

Mesurande	Capteur
Position (m, rad)	Potentiomètre - Inclinomètre
Vitesse ( $\text{m.s}^{-1}$ , $\text{rad.s}^{-1}$ )	Tachymètre
Accélération ( $\text{m.s}^{-2}$ , $\text{rad.s}^{-2}$ )	Accéléromètre
Force (N)	Dynamomètre
Flux lumineux (Lux)	Luxmètre
Déformation (m)	Jauge de contrainte

## Mesurage – Effectuer des mesures

**Processus consistant à obtenir expérimentalement une ou plusieurs valeurs que l'on peut raisonnablement attribuer à un mesurande**

## Mesurage – Effectuer des mesures

**Processus consistant à obtenir expérimentalement une ou plusieurs valeurs que l'on peut raisonnablement attribuer à un mesurande**

**Pourquoi « raisonnablement » ?**



## Mesurage – Effectuer des mesures

**Processus consistant à obtenir expérimentalement une ou plusieurs valeurs que l'on peut raisonnablement attribuer à un mesurande**

**Parce qu'il peut exister des grandeurs d'influences & des erreurs de mesures**

## Mesurage – Effectuer des mesures

**Processus consistant à obtenir expérimentalement une ou plusieurs valeurs que l'on peut raisonnablement attribuer à un mesurande**

## Grandeur d'influence

**Le capteur, sensible au mesurande, peut également l'être, dans une moindre mesure, à d'autres grandeurs physiques**

**Influence de la Température sur un capteur de force par exemple**

## Mesurage – Effectuer des mesures

**Processus consistant à obtenir expérimentalement une ou plusieurs valeurs que l'on peut raisonnablement attribuer à un mesurande**

## Grandeur d'influence

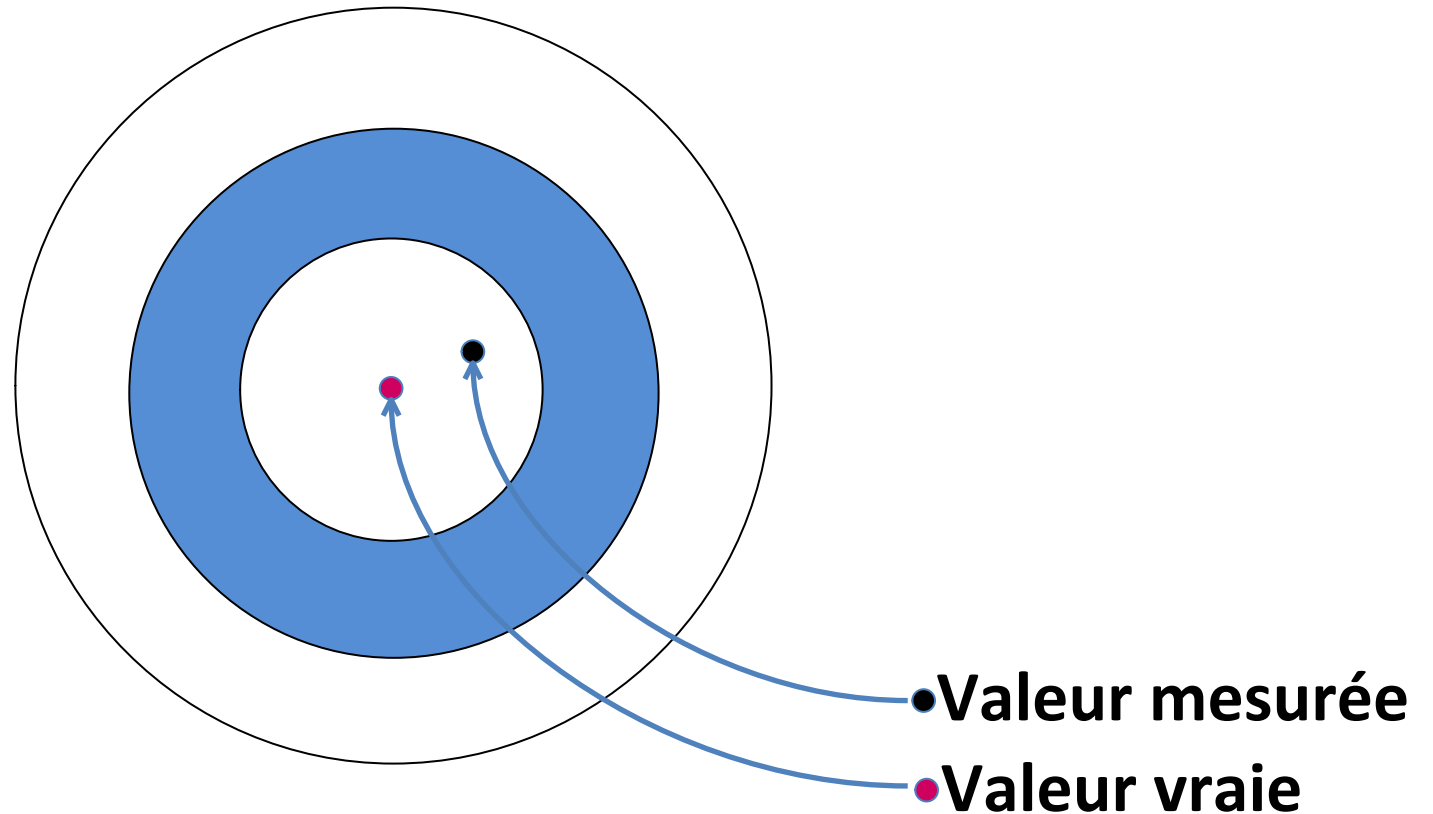
**Le capteur, sensible au mesurande, peut également l'être, dans une moindre mesure, à d'autres grandeurs physiques**

## Erreurs de mesure

- **Erreurs systématiques**  
décalage constant entre valeur vraie et mesurée
- **Erreurs accidentelles**  
décalage aléatoire entre valeur vraie et mesurée

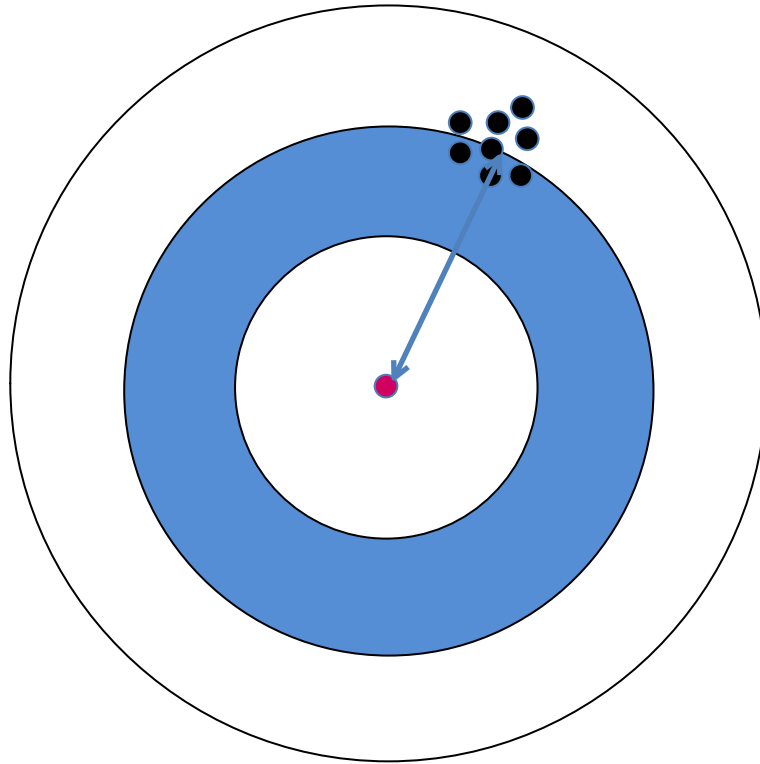
## Erreurs de mesure

- Erreurs systématiques
- Erreurs accidentelles



## Erreurs de mesure

- Erreurs systématiques
- Erreurs accidentelles

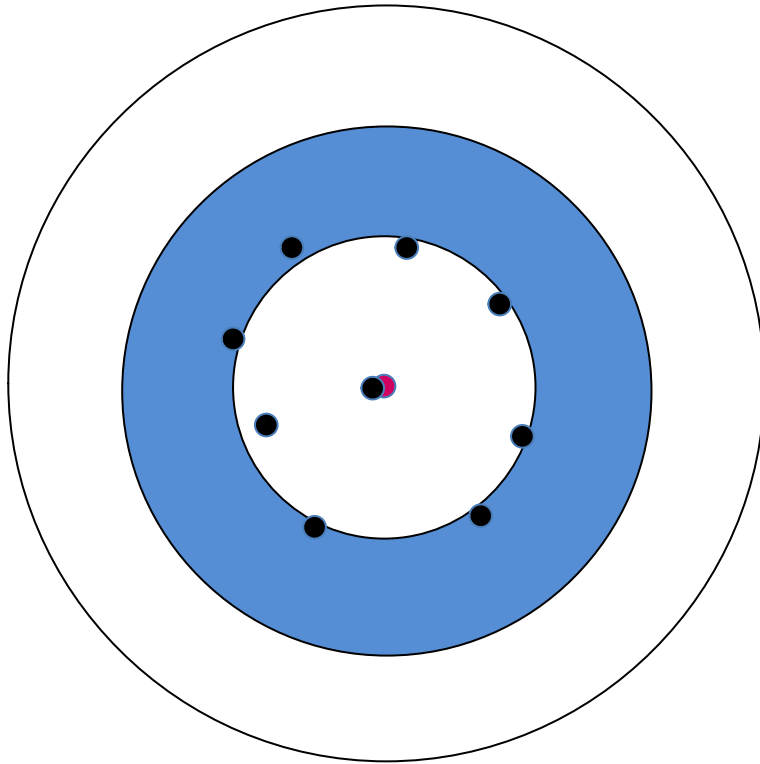


Capteur fidèle mais non juste

- Valeur mesurée
- Valeur vraie

## Erreurs de mesure

- Erreurs systématiques
- Erreurs accidentelles

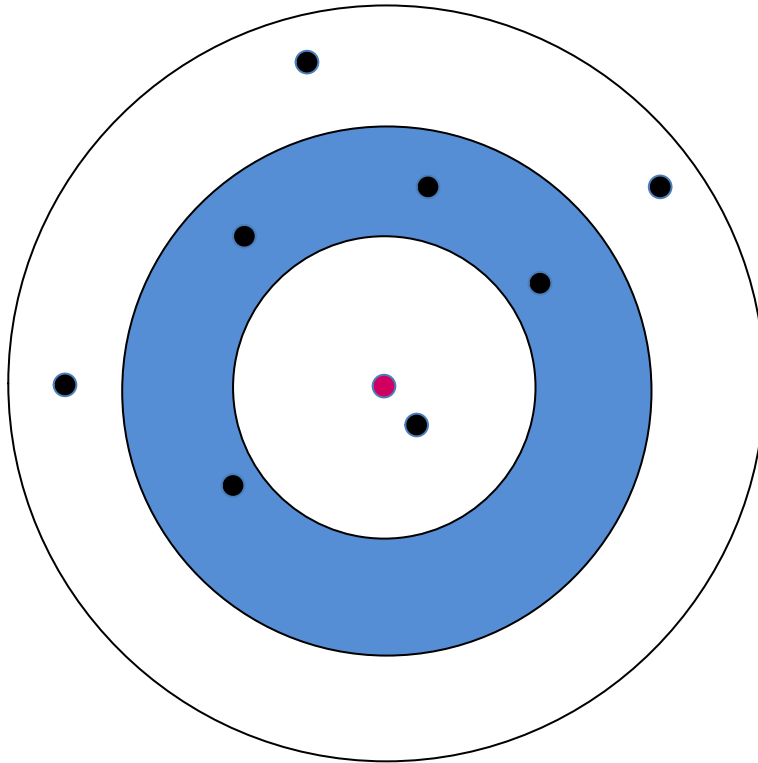


Capteur juste mais non fidèle

- Valeur mesurée
- Valeur vraie

## Erreurs de mesure

- Erreurs systématiques
- Erreurs accidentelles

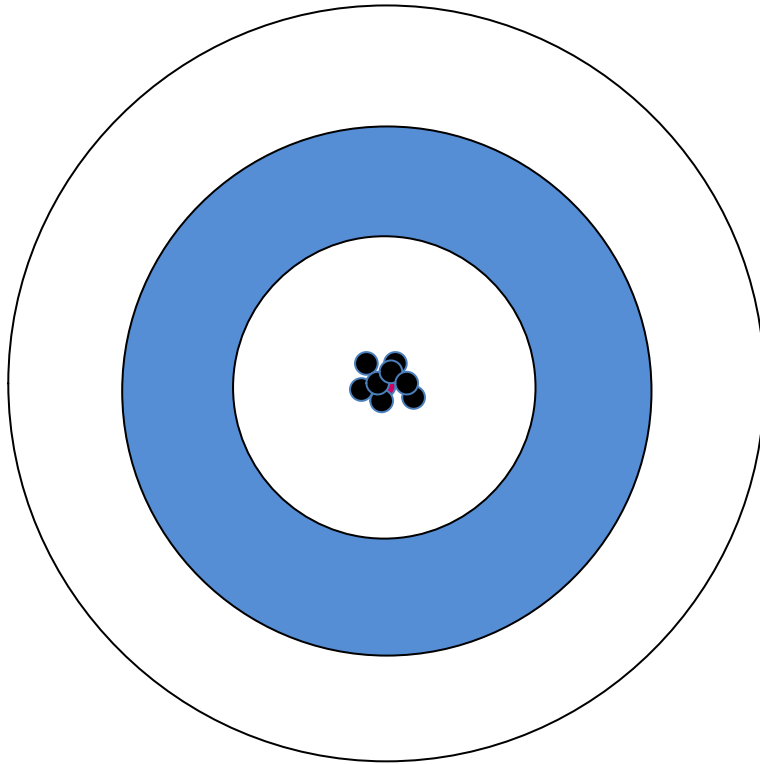


Capteur ni juste ni fidèle

- Valeur mesurée
- Valeur vraie

## Erreurs de mesure

- Erreurs systématiques
- Erreurs accidentelles



**Capteur juste & fidèle : précis**

- Valeur mesurée
- Valeur vraie





**On se propose d'étudier la température d'une pièce réglée à 24°C. Voici des valeurs obtenues lors de ce mesurage :**

24,6°C	23,2°C	24,7°C	23,4°C	24,1°C
--------	--------	--------	--------	--------

**A VOUS !**

**Calculer la valeur moyenne et l'écart type de ces mesures  
Peut-on dire si le capteur utilisé est juste et fidèle ?**



**Calculer la valeur moyenne et l'écart type de ces mesures**

$$\mu = \frac{24.6 + 23.2 + 24.7 + 23.4 + 24.1}{5} = 24$$

$$\sigma^2 = \frac{0.6^2 + 0.8^2 + 0.7^2 + 0.6^2 + 0.1^2}{5} = \frac{1.86}{5}$$

$$\sigma \cong 0.61$$

A VOUS !



**Peut-on dire si le capteur utilisé est juste et fidèle ?**

**Capteur juste**

**Fidèle ?**

**A VOUS !**



**Peut-on dire si le capteur utilisé est juste et fidèle ?**

**Capteur juste**

**A VOUS !**

**On ne peut rien dire sur la fidélité car il manque une donnée sur le capteur : sa résolution  
Sa plus petite valeur mesurable**

## Résolution

**La plus petite variation du mesurande observable par le capteur**



A VOUS !

**On sait maintenant que le capteur utilisé  
a une résolution de  $0.1^{\circ}\text{C}$**

**Capteur juste**

**Fidèle ?**



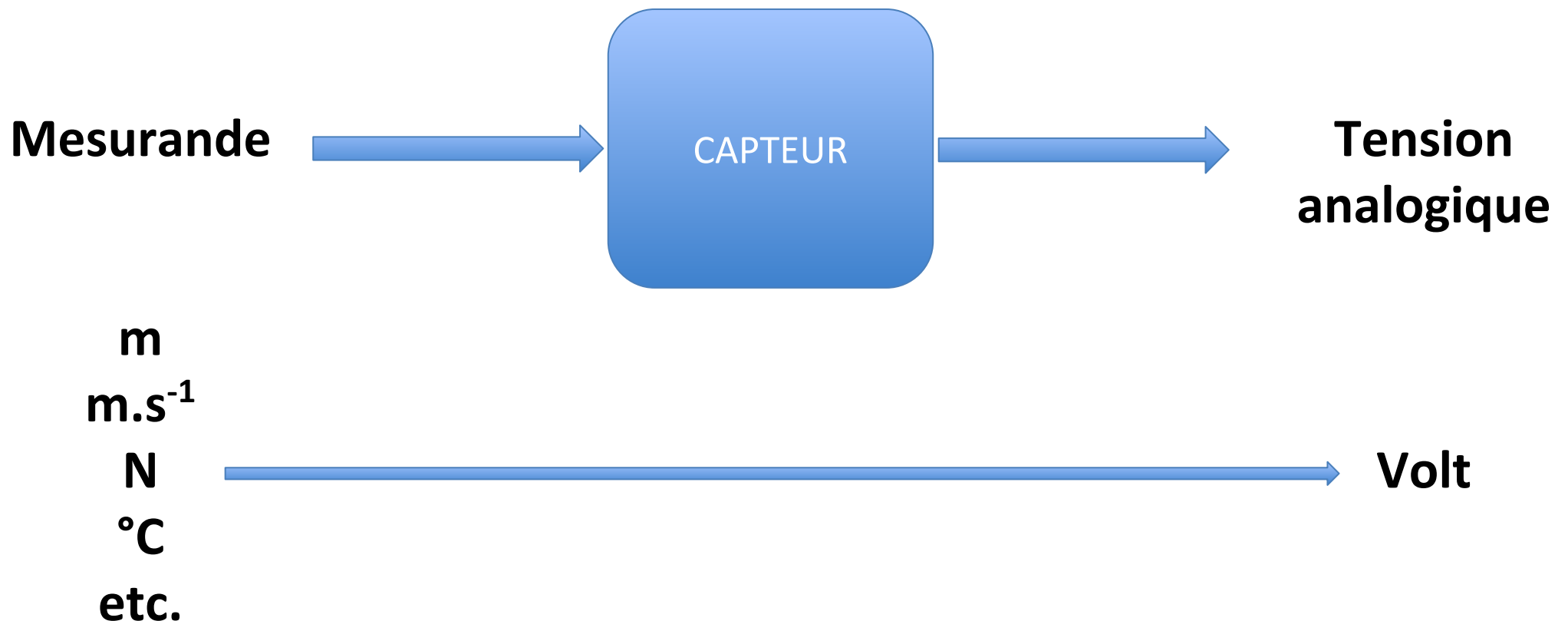
A VOUS !

**On sait maintenant que le capteur utilisé  
a une résolution de  $0.1^{\circ}\text{C}$**

**Capteur juste**

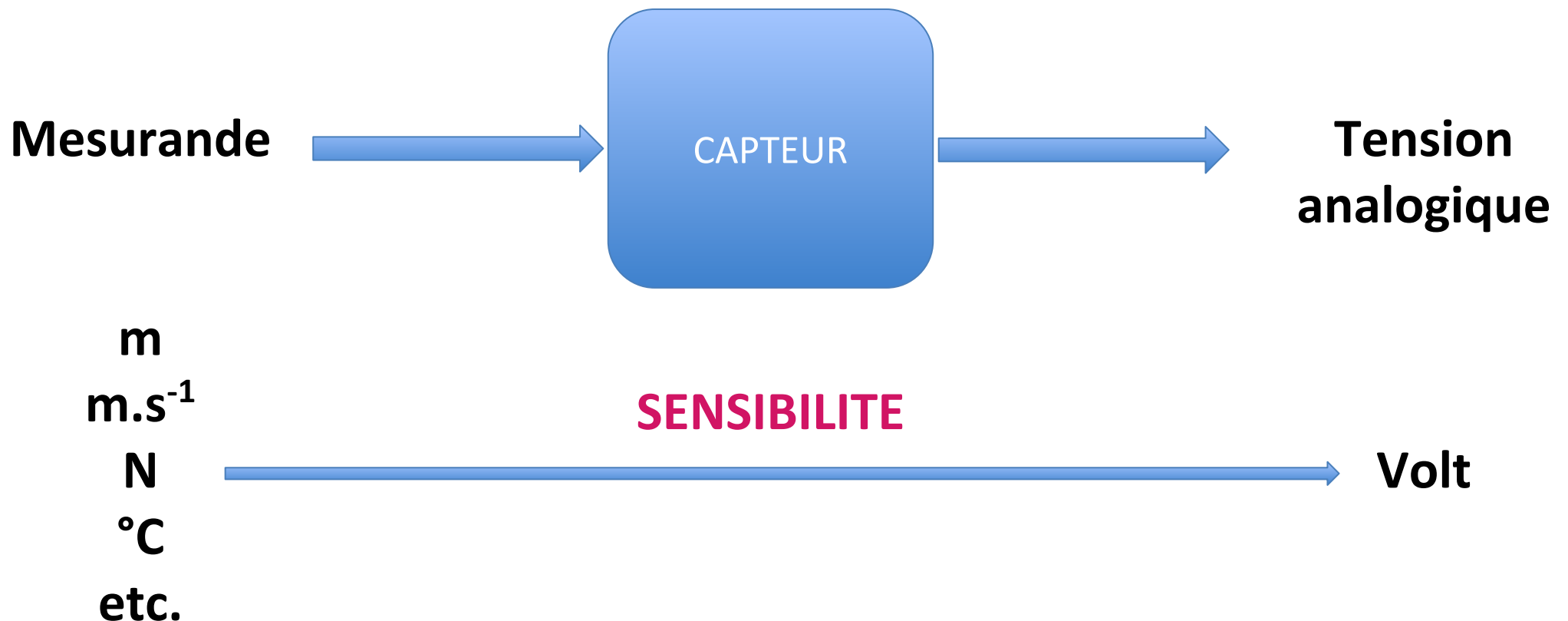
**Capteur non fidèle**

Très souvent, ce que délivre le capteur est une tension analogique  
**Il faut passer de la grandeur du mesurande à des volts**





Très souvent, ce que délivre le capteur est une tension analogique  
**Il faut passer de la grandeur du mesurande à des volts**



## Résolution

**La plus petite variation du mesurande observable par le capteur**

## Sensibilité

**Réponse du capteur en fonction du mesurande**

- **Sensibilité statique**
- **Sensibilité dynamique**



AVOUS!

**On sait maintenant que pour 24°C, le capteur délivre 0Volt. On obtient le tableau suivant lors des mesures statiques**

°C	24,6°C	23,2°C	24,7°C	23,4°C	24,1°C
Volt	0,06	-0,08	0,07	-0,06	0,01

**Donner l'équation qui lie la tension V de sortie du capteur au mesurande T (température)  
Quelle est la sensibilité du capteur?**



A VOUS !

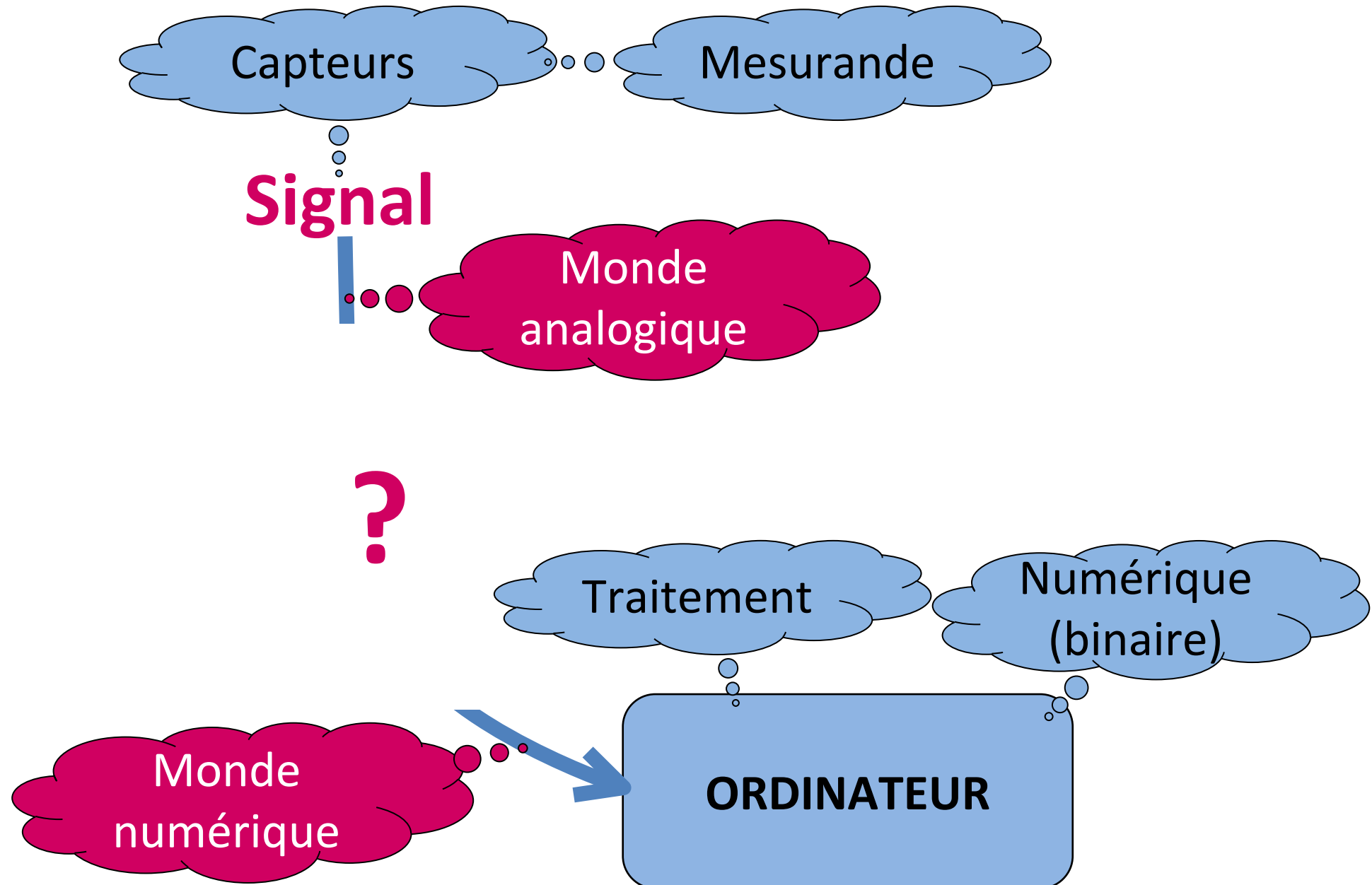
**On sait maintenant que pour 24°C, le capteur délivre 0Volt. On obtient le tableau suivant lors des mesures statiques**

°C	24,6°C	23,2°C	24,7°C	23,4°C	24,1°C
Volt	0,06	-0,08	0,07	-0,06	0,01

$$V = 0.1(T - 24)$$

$$S = 0.1V / ^\circ C$$

# Présentation, objectifs



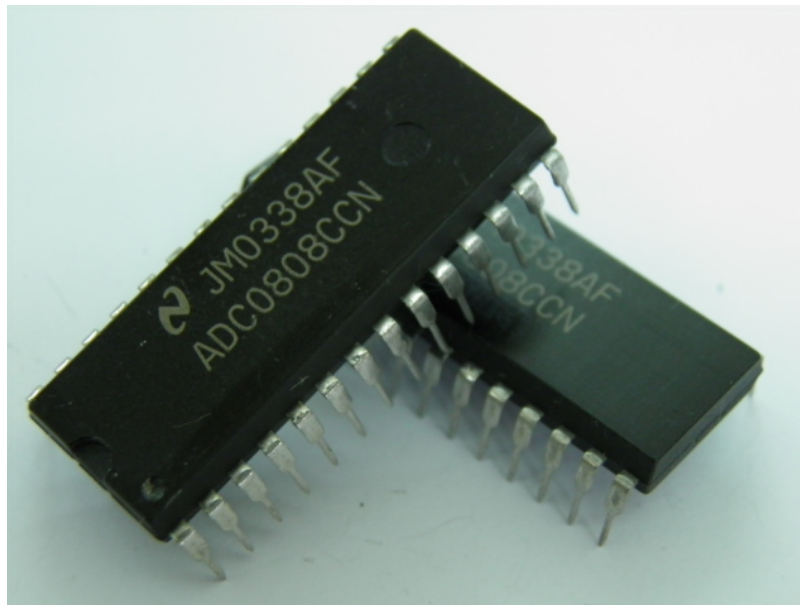
## Première partie – Signal, notions de métrologie, acquisition

- a) Présentation du concept de Signal
- b) Notions de métrologie – Capteur
- c) Du monde analogique au monde numérique : le composant
- d) Les différentes étapes de cette conversion et le théorème de Shannon-Nyquist
- e) Les caractéristiques essentielles de la Conversion Analogique/Numérique

# Le Convertisseur Analogique Numérique

## Définition

**Composant électronique destiné à fournir une représentation numérique d'un signal analogique**



# Le Convertisseur Analogique Numérique

## Nombreuses technologies

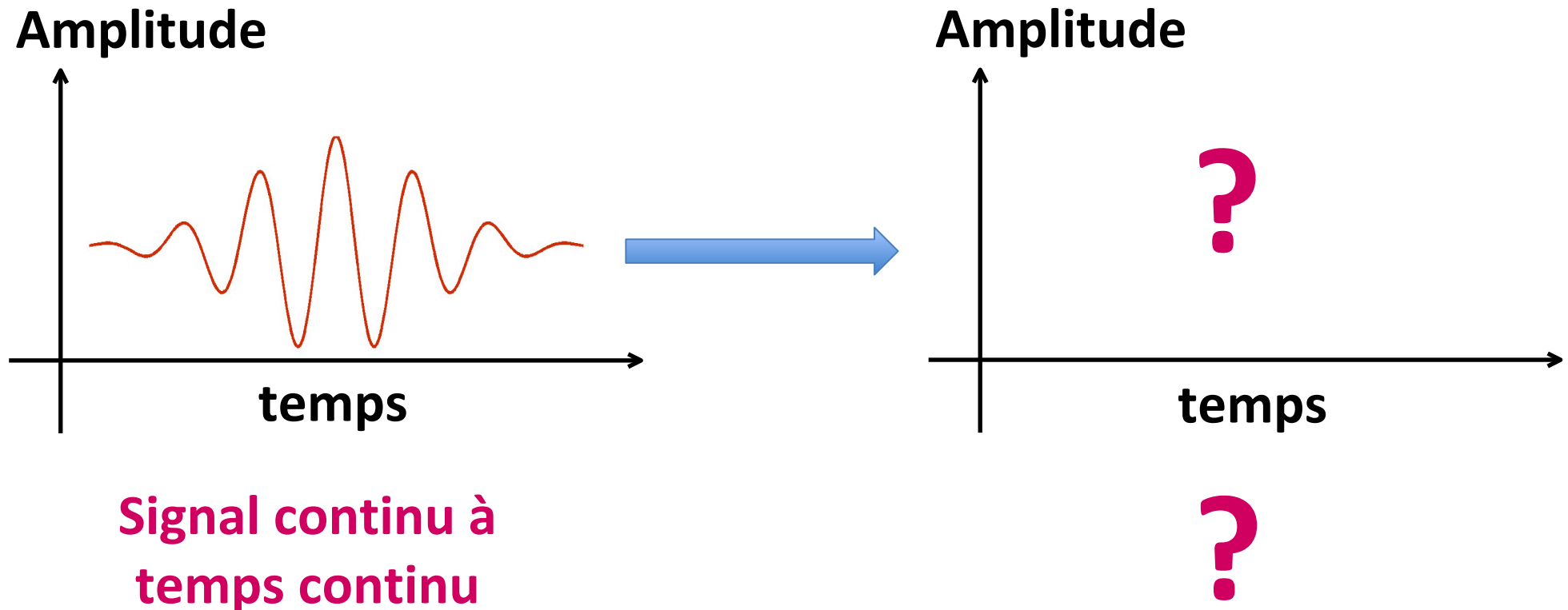
**Simple rampe, Double rampe, Flash, Delta Sigma, etc.  
Toutes passent d'une représentation analogique  
à une représentation numérique**



# Le Convertisseur Analogique Numérique

## Nombreuses technologies

Simple rampe, Double rampe, Flash, Delta Sigma, etc.  
Toutes passent d'une représentation analogique  
à une représentation numérique



## Premier état de fait

**Ce composant prend un certain temps  
pour effectuer les conversions**

# Le Convertisseur Analogique Numérique

## Premier état de fait

**Ce composant prend un certain temps  
pour effectuer les conversions**

## Deuxième état de fait

**Ce composant ne peut pas rendre compte de l'infinité de  
valeurs que peut prendre le signal analogique  
(Cf précédemment)**

## Première partie – Signal, notions de métrologie, acquisition

- a) Présentation du concept de Signal
- b) Notions de métrologie – Capteur
- c) Du monde analogique au monde numérique : le composant
- d) Les différentes étapes de cette conversion et le théorème de Shannon-Nyquist**
- e) Les caractéristiques essentielles de la Conversion Analogique/Numérique

Conséquence premier état de fait

**ECHANTILLONNAGE**

# Le Convertisseur Analogique Numérique

Conséquence premier état de fait

**ECHANTILLONNAGE**

Conséquence deuxième état de fait

**QUANTIFICATION**

# Les différentes étapes de cette conversion

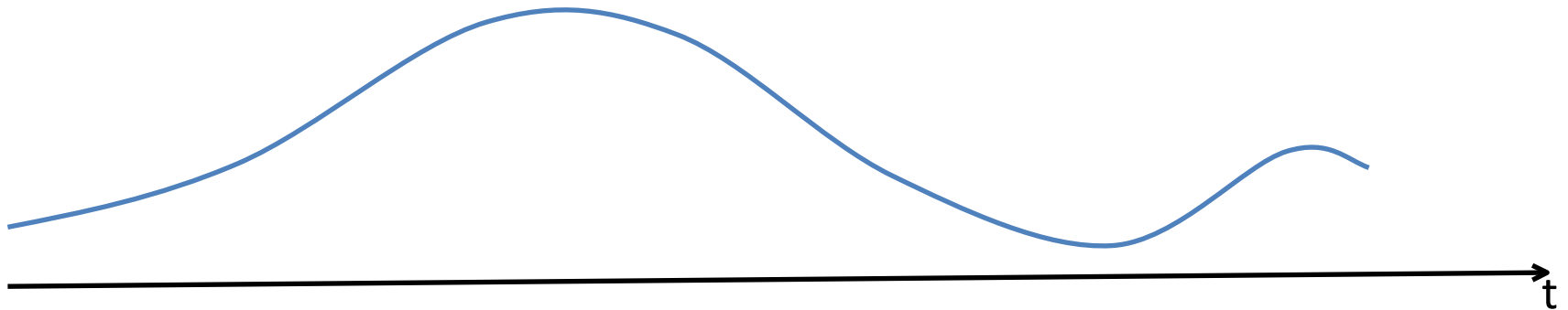
## L'étape d'échantillonnage

**Capturer des valeurs du signal à intervalle de temps régulier**

# Les différentes étapes de cette conversion

## L'étape d'échantillonnage

Capturer des valeurs du signal à intervalle de temps régulier

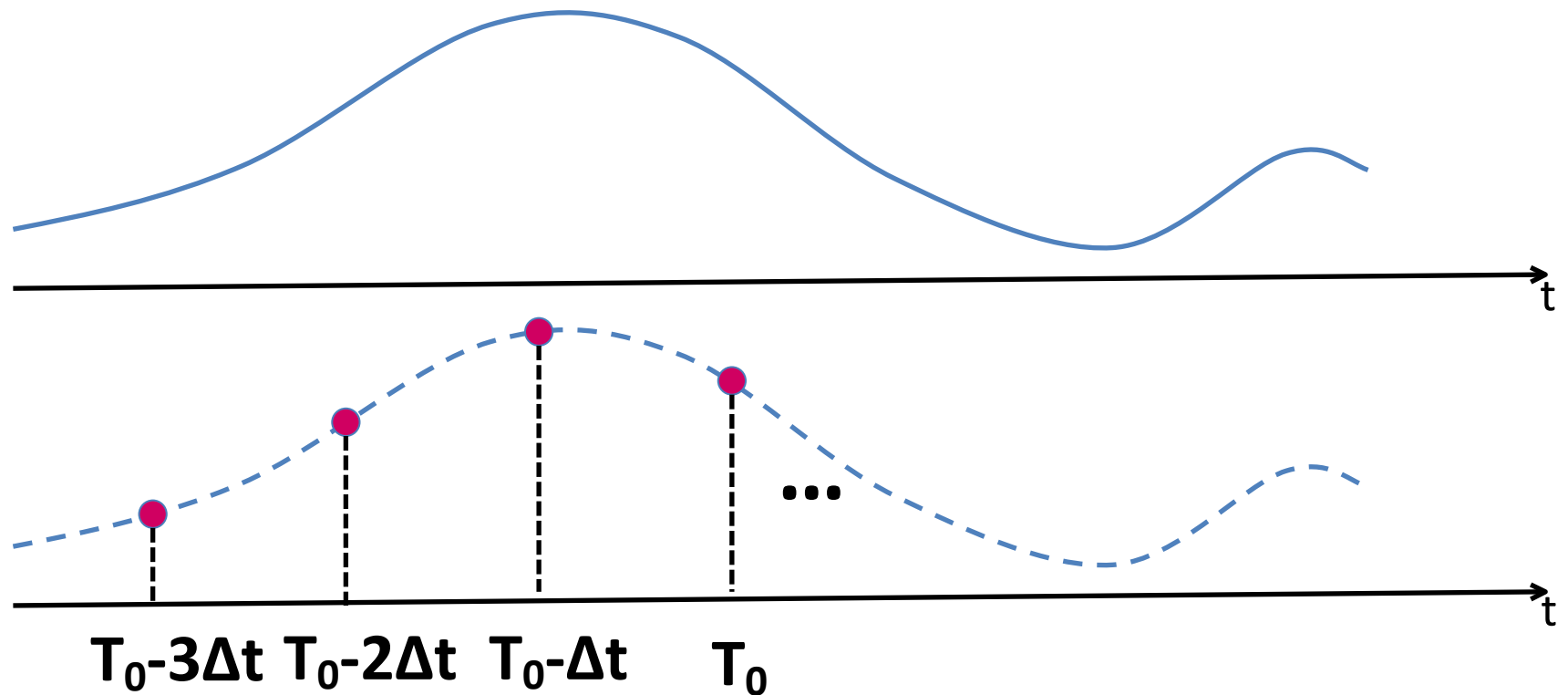




# Les différentes étapes de cette conversion

## L'étape d'échantillonnage

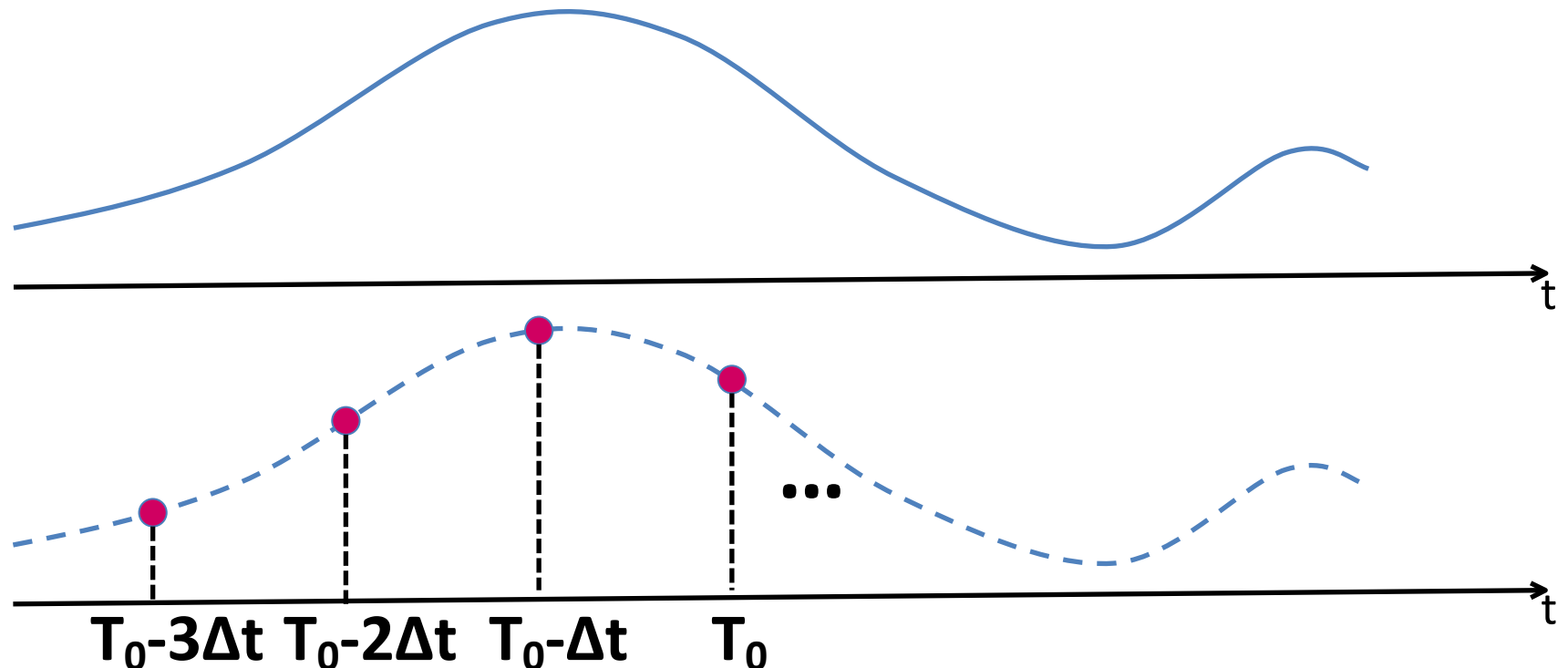
Capturer des valeurs du signal à intervalle de temps régulier



# Les différentes étapes de cette conversion

## L'étape d'échantillonnage

Ce pas de temps  $\Delta t$  est appelé **période d'échantillonnage**  
Souvent noté  $T_e$  – Son inverse est **la fréquence d'échantillonnage  $F_e$**



# Les différentes étapes de cette conversion



**Peut-on choisir n'importe quelle valeur pour  $F_e$  ?**

**Soit le signal suivant :**

$$s(t) = \cos(2\pi t)$$

**A VOUS !**

**Quelle est la période  $T$  de ce signal ?**

**Quelle devra être la fréquence d'échantillonnage si on souhaite avoir 4 échantillons par période ?**

**Au minimum, combien d'échantillon doit-on avoir pour reconstituer correctement ce signal ?**

**Que vaut alors la fréquence d'échantillonnage ?**

# Les différentes étapes de cette conversion



**$T = 1s$**

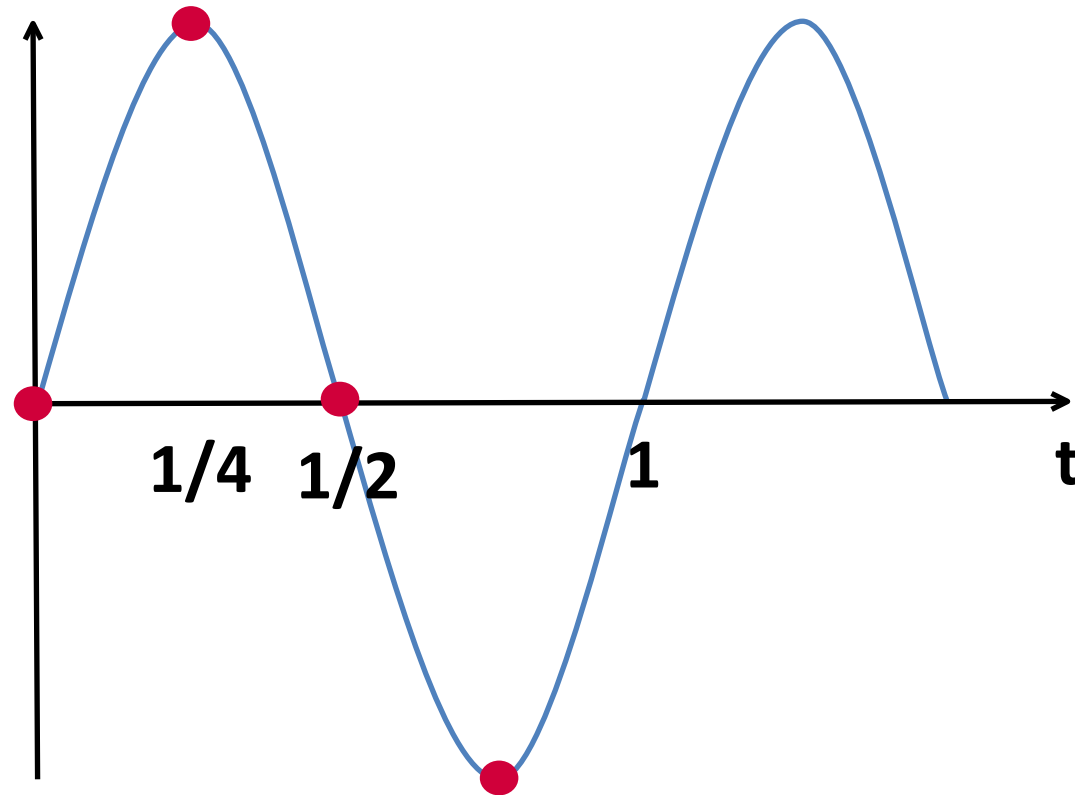
A VOUS !

# Les différentes étapes de cette conversion



A VOUS !

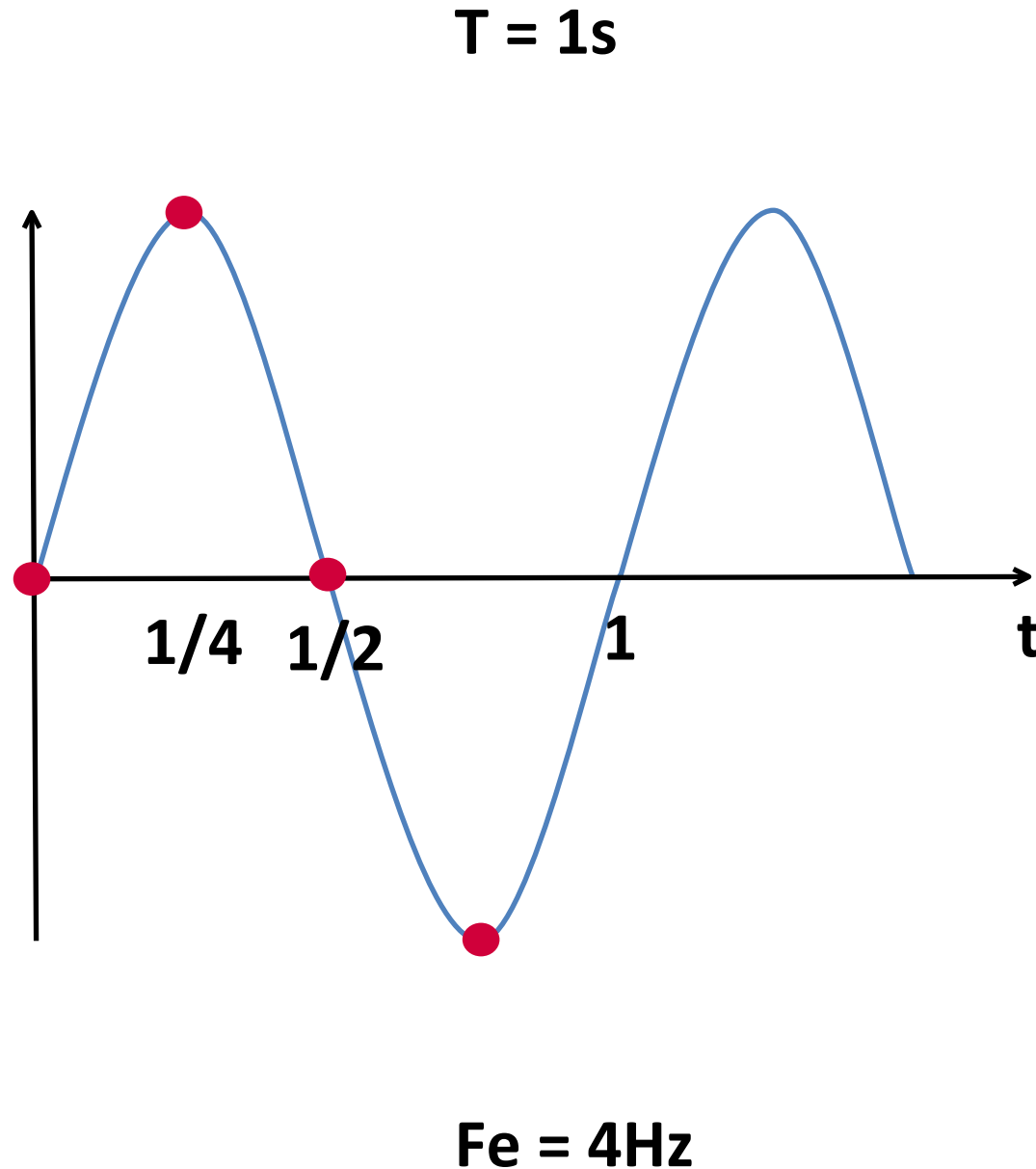
$$T = 1s$$



# Les différentes étapes de cette conversion



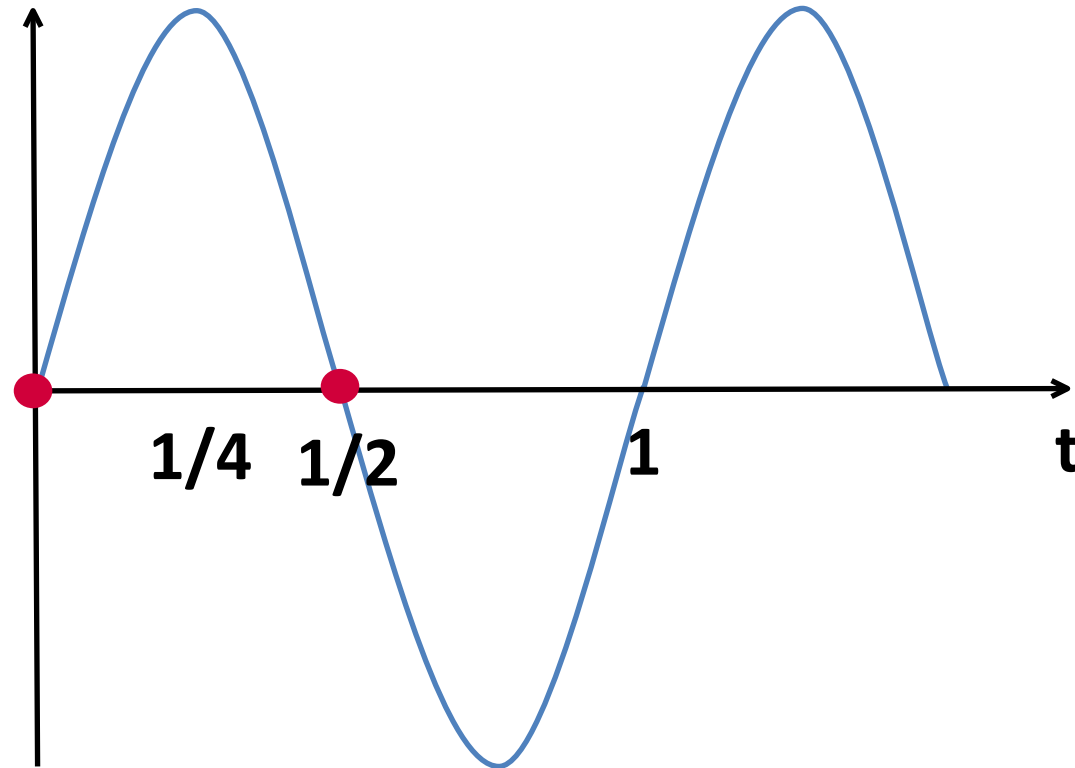
A VOUS !



# Les différentes étapes de cette conversion



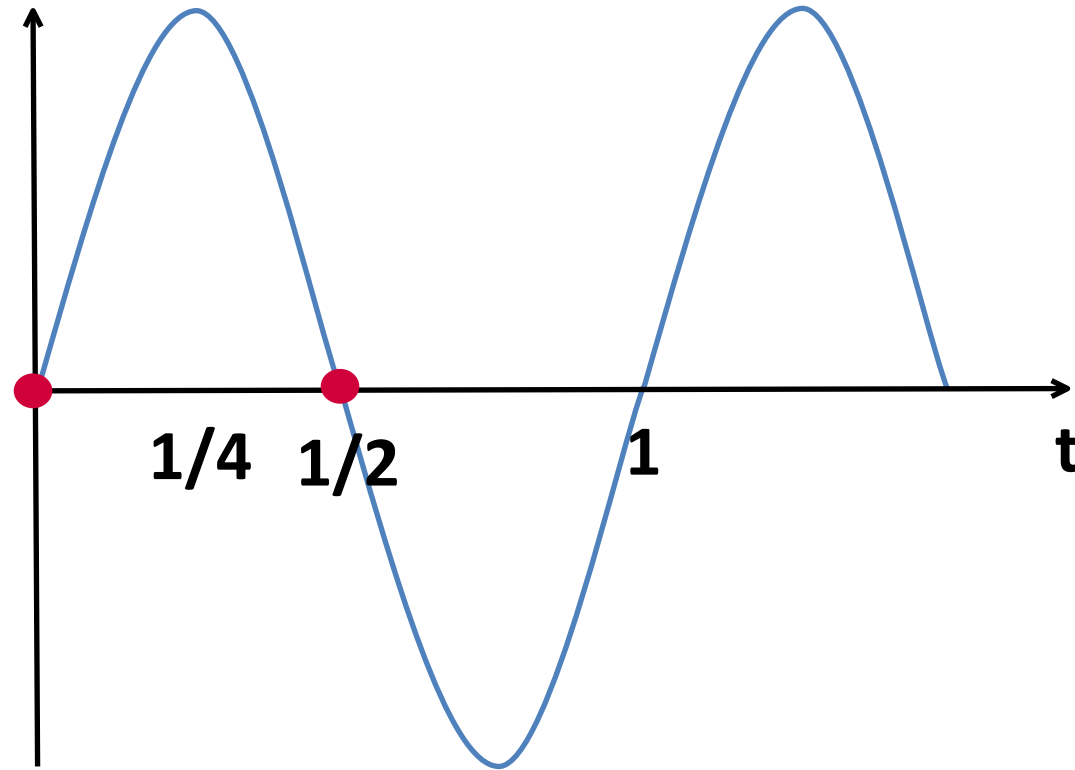
A VOUS !



# Les différentes étapes de cette conversion



A VOUS !



$$F_e = 2\text{Hz}$$



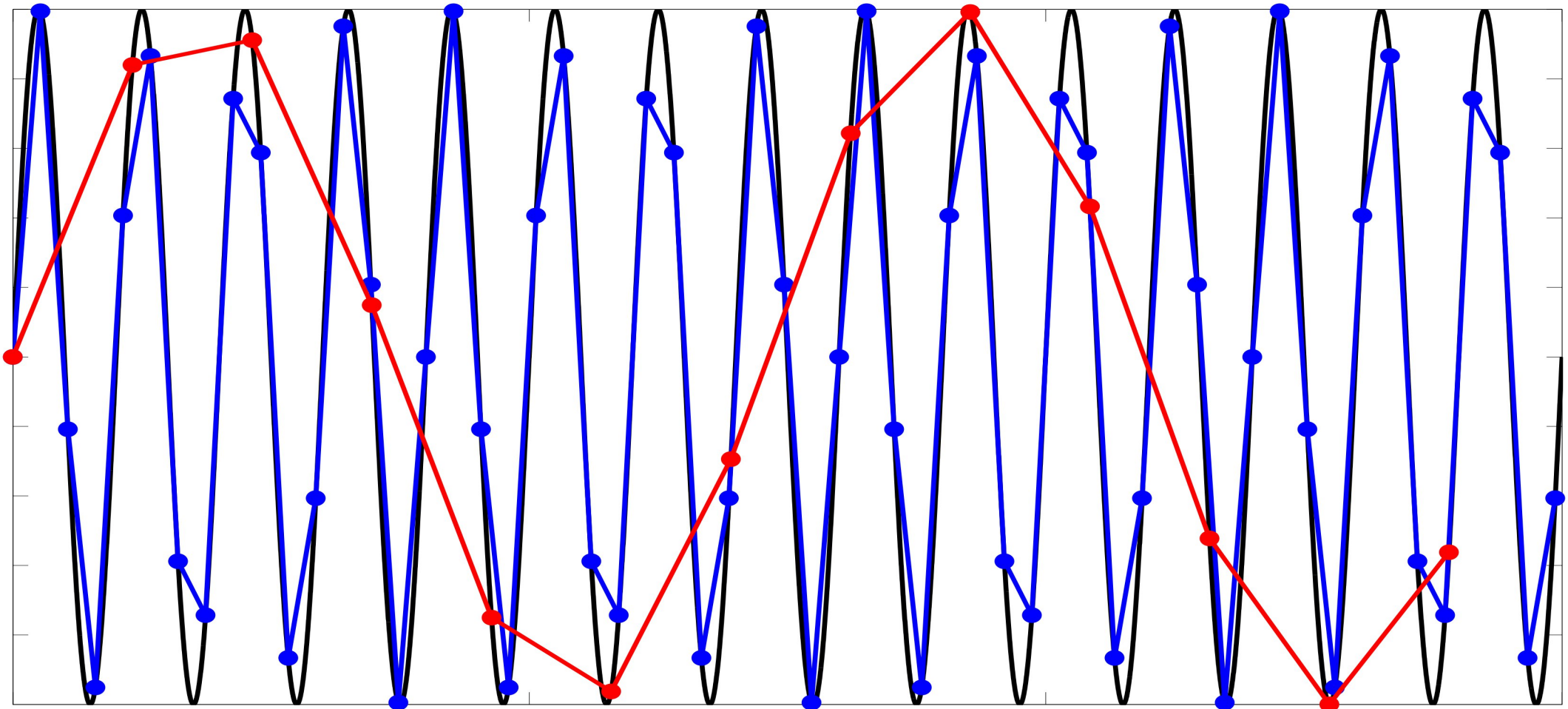
# Les différentes étapes de cette conversion

## Le théorème de Shannon-Nyquist

Signal initial

Signal correctement  
échantillonné

Signal « sous »  
échantillonné

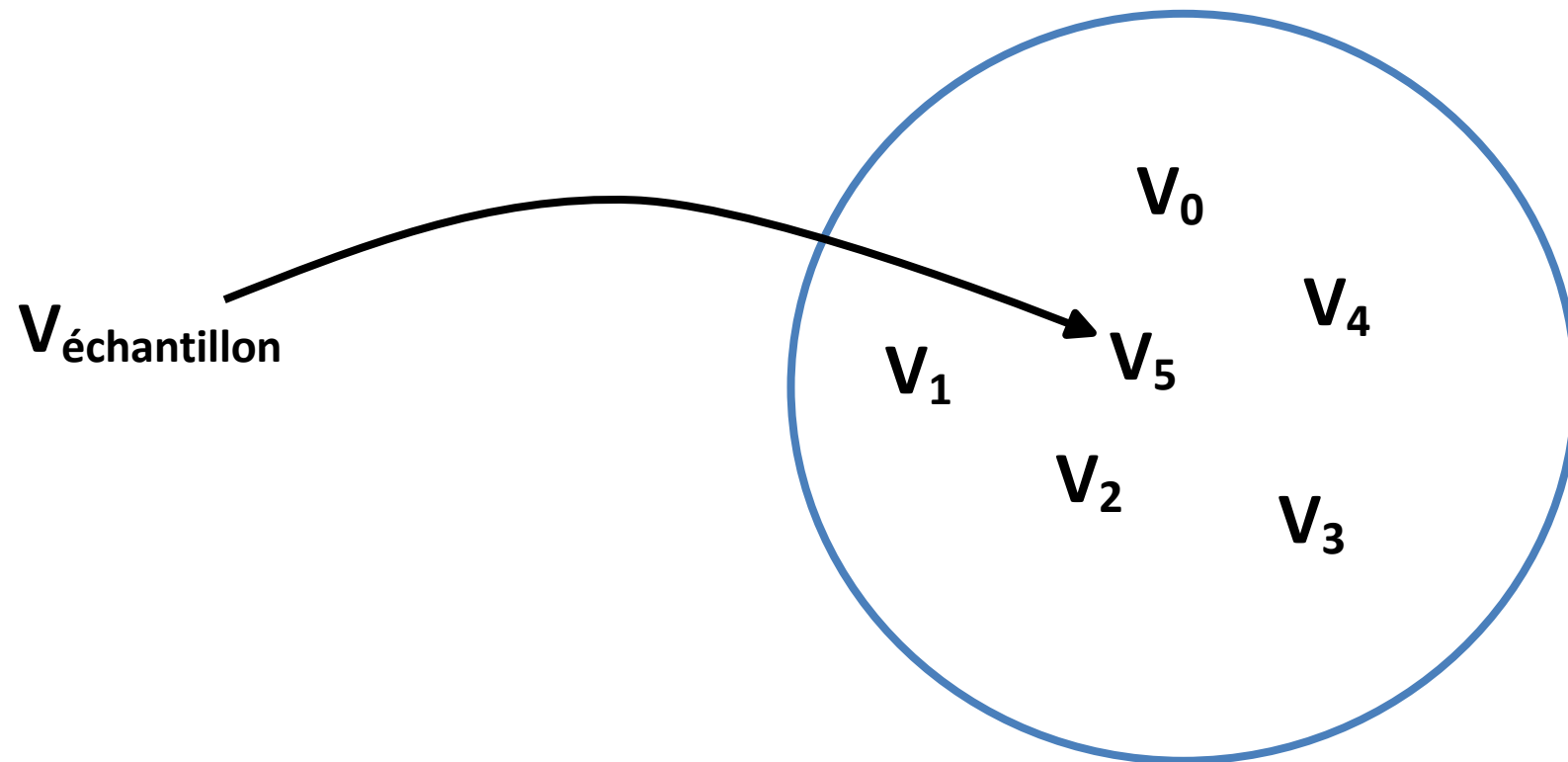


**Pour acquérir correctement un signal, la fréquence d'échantillonnage doit être égale ou supérieure au double de la fréquence maximale contenue dans ce signal**

# Les différentes étapes de cette conversion

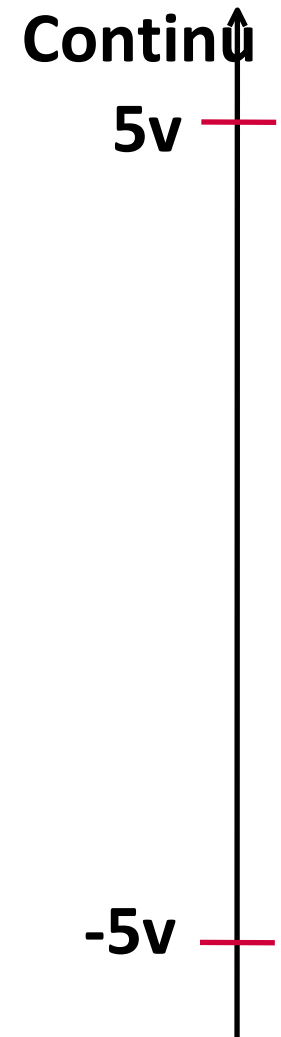
## L'étape de Quantification

**Associer à chaque échantillon la valeur discrète la plus proche prise dans un ensemble fini de valeurs discrètes**



# Quantification : exemple sur 4 bits

Gamme signal d'entrée : -5 à +5 volts

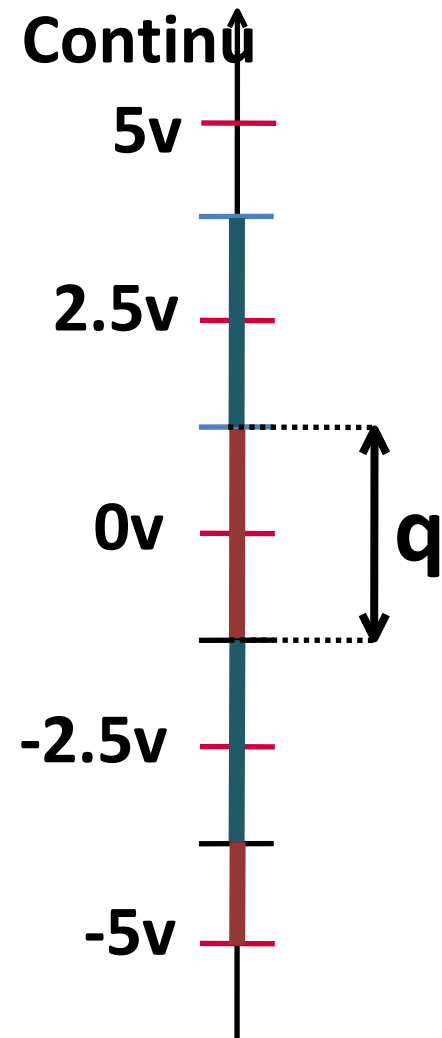


# Quantification : exemple sur 4 bits

Gamme signal d'entrée : -5 à +5 volts

► On découpe cette gamme en 4 « tranches »

► Pas de quantification  $q = 10/4 = 2.5\text{v}$



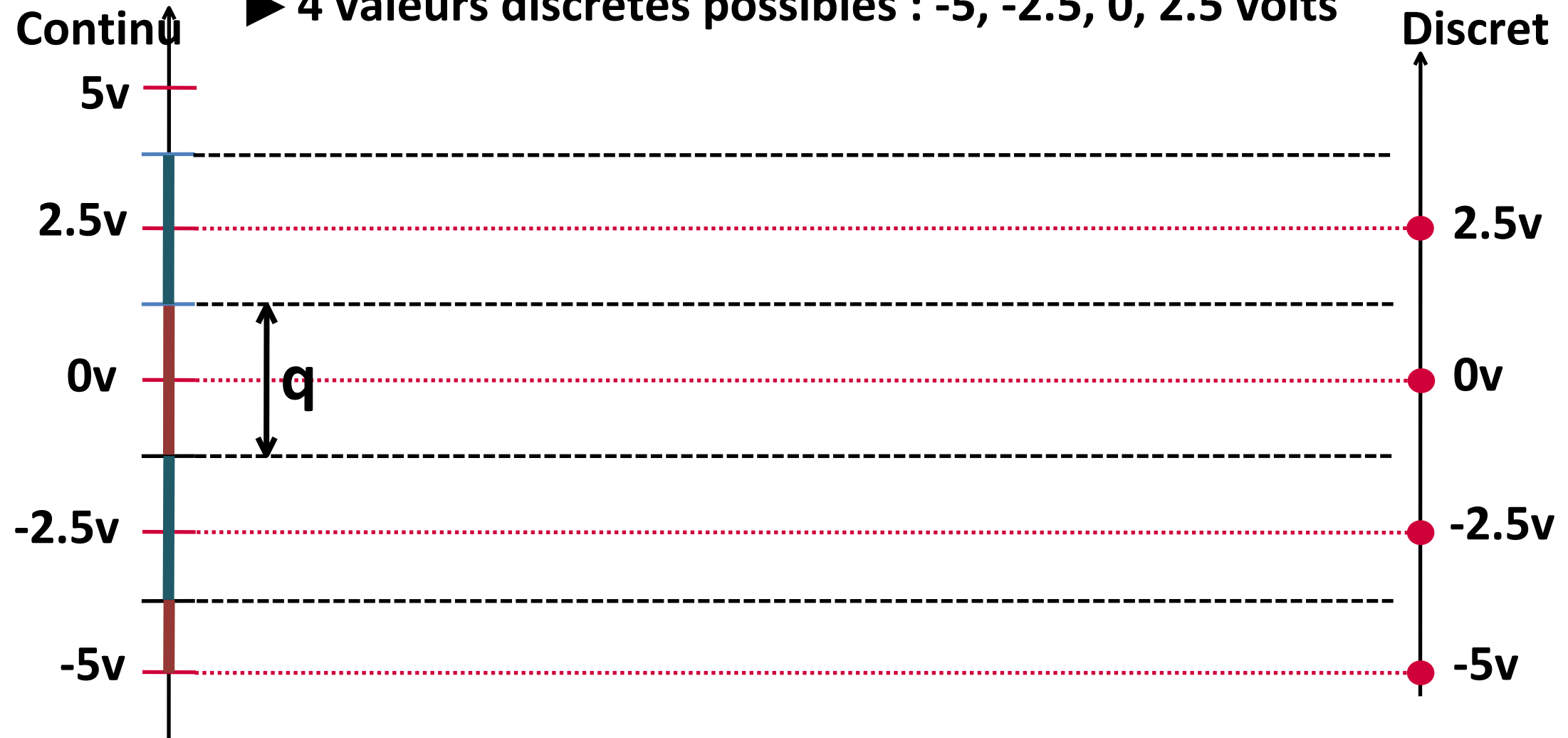
# Quantification : exemple sur 4 bits

Gamme signal d'entrée : -5 à +5 volts

► On découpe cette gamme en 4 « tranches »

► Pas de quantification  $q = 10/4 = 2.5\text{v}$

► 4 valeurs discrètes possibles : -5, -2.5, 0, 2.5 volts



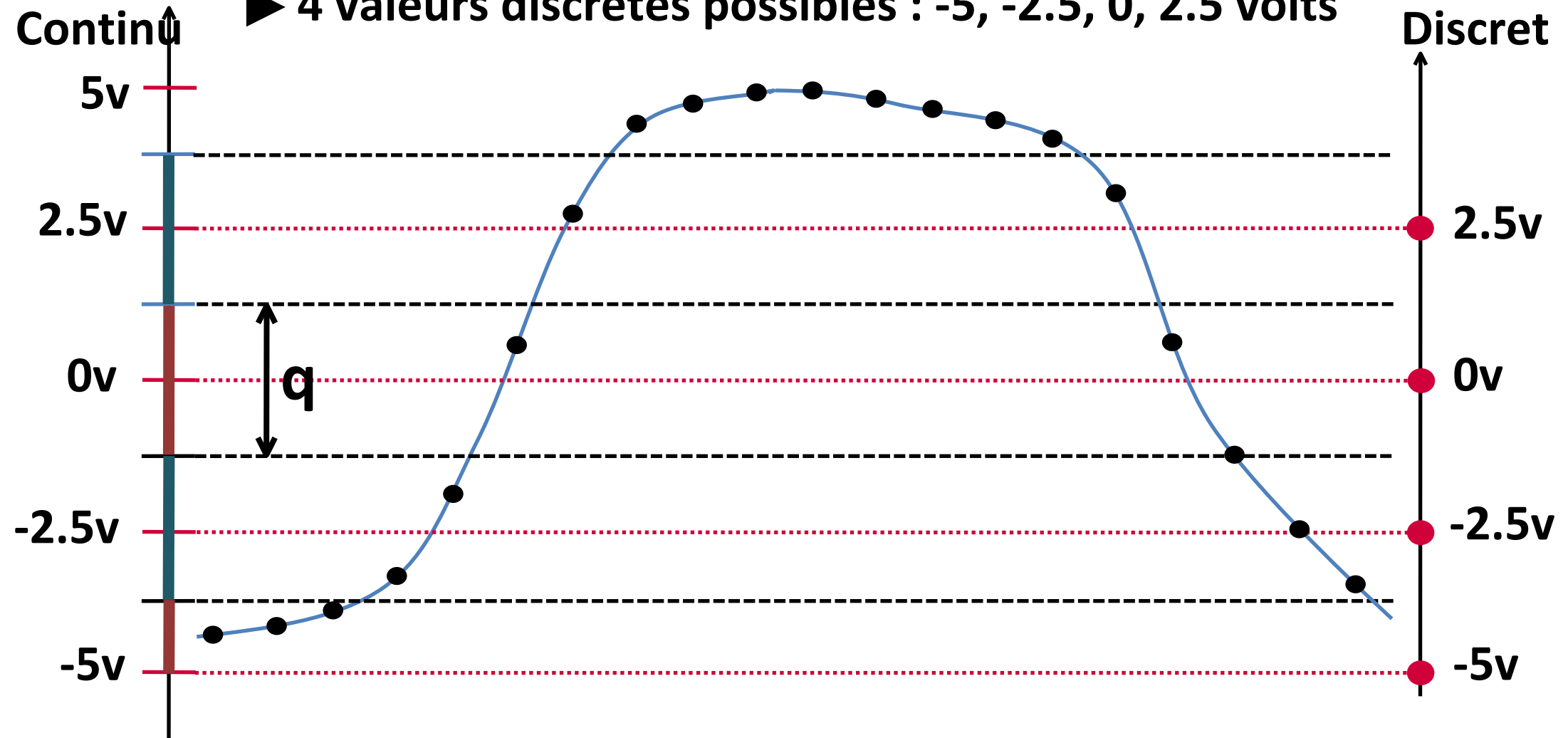
# Quantification : exemple sur 4 bits

Gamme signal d'entrée : -5 à +5 volts

► On découpe cette gamme en 4 « tranches »

► Pas de quantification  $q = 10/4 = 2.5\text{v}$

► 4 valeurs discrètes possibles : -5, -2.5, 0, 2.5 volts



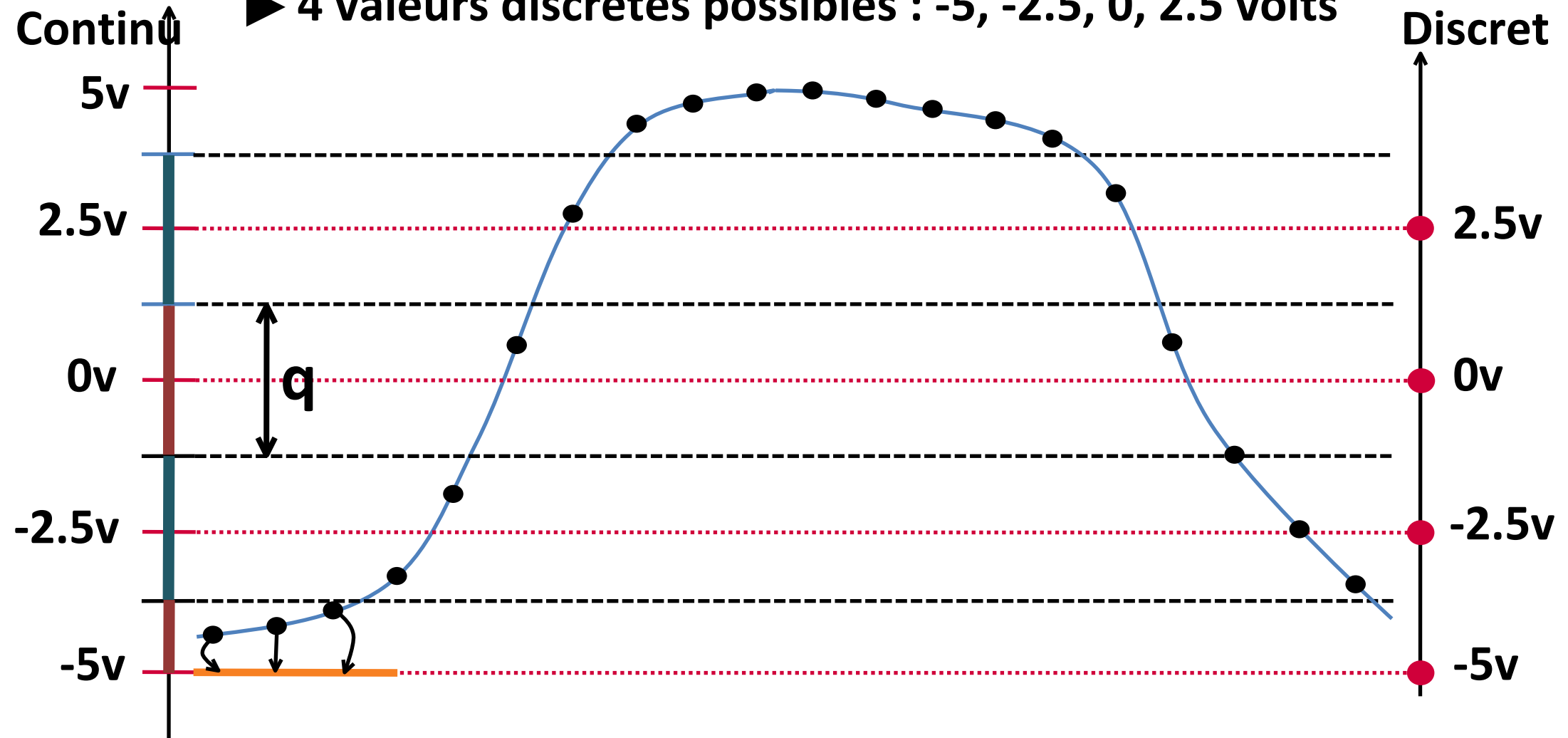
# Quantification : exemple sur 4 bits

Gamme signal d'entrée : -5 à +5 volts

► On découpe cette gamme en 4 « tranches »

► Pas de quantification  $q = 10/4 = 2.5\text{v}$

► 4 valeurs discrètes possibles : -5, -2.5, 0, 2.5 volts





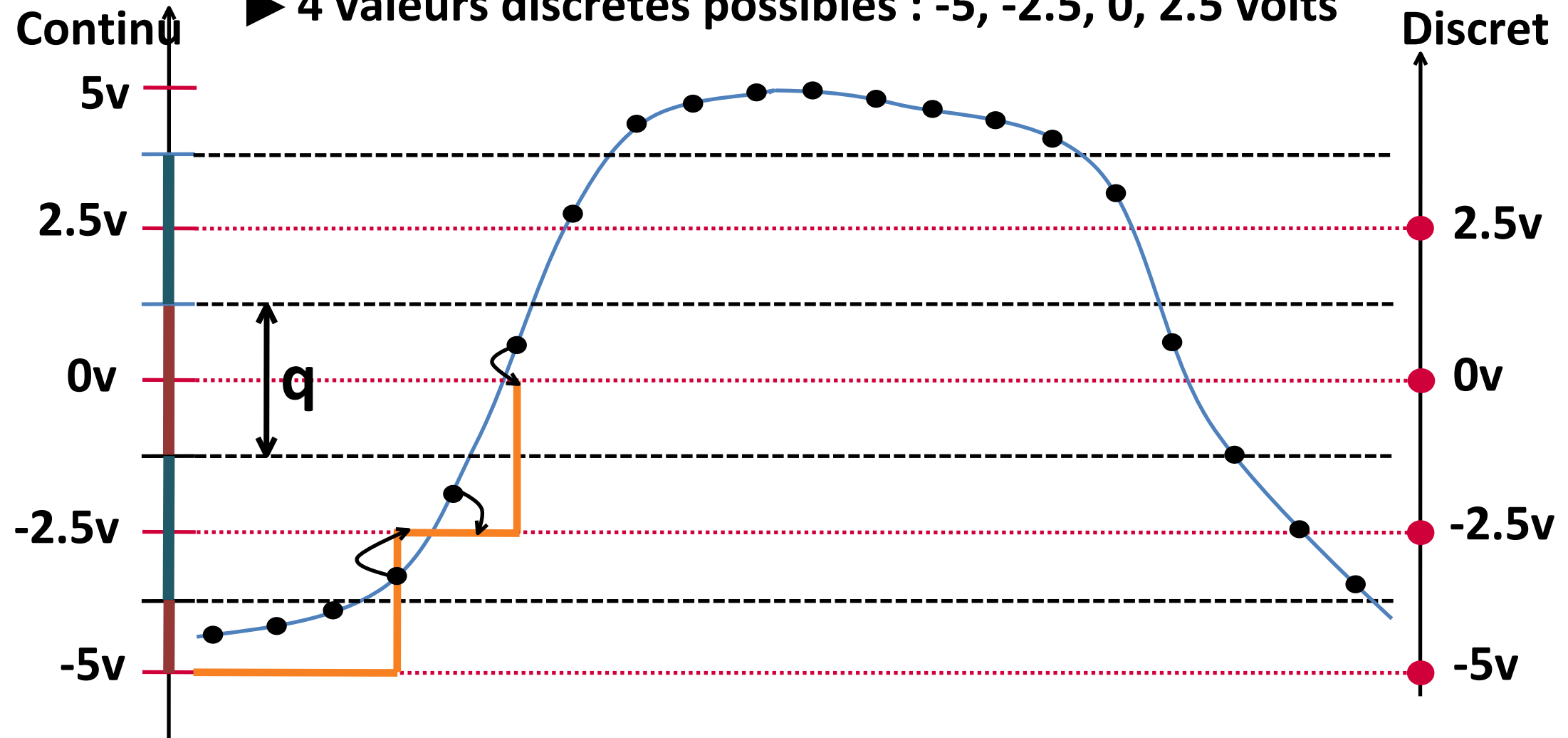
# Quantification : exemple sur 4 bits

Gamme signal d'entrée : -5 à +5 volts

► On découpe cette gamme en 4 « tranches »

► Pas de quantification  $q = 10/4 = 2.5\text{v}$

► 4 valeurs discrètes possibles : -5, -2.5, 0, 2.5 volts



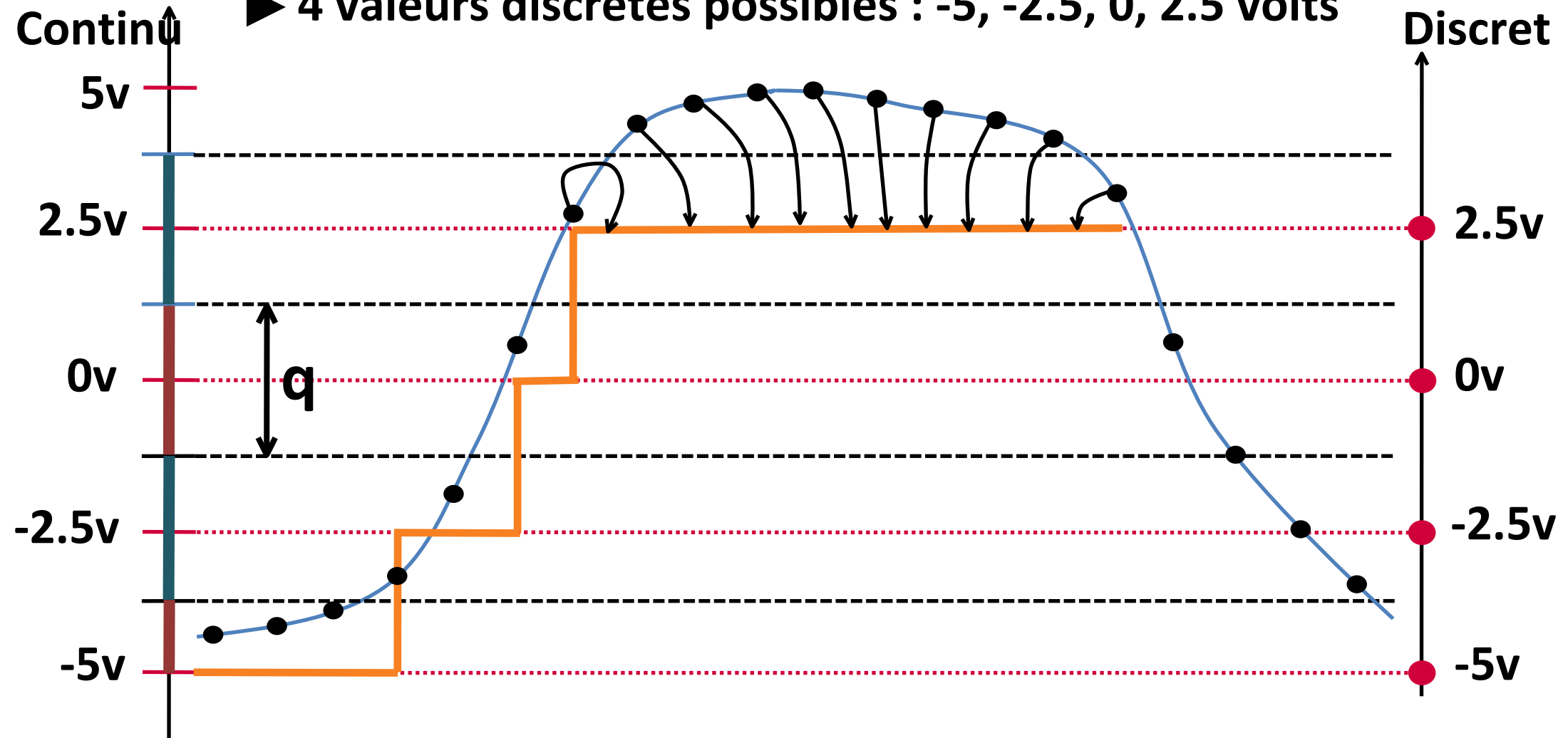
# Quantification : exemple sur 4 bits

Gamme signal d'entrée : -5 à +5 volts

► On découpe cette gamme en 4 « tranches »

► Pas de quantification  $q = 10/4 = 2.5\text{v}$

► 4 valeurs discrètes possibles : -5, -2.5, 0, 2.5 volts



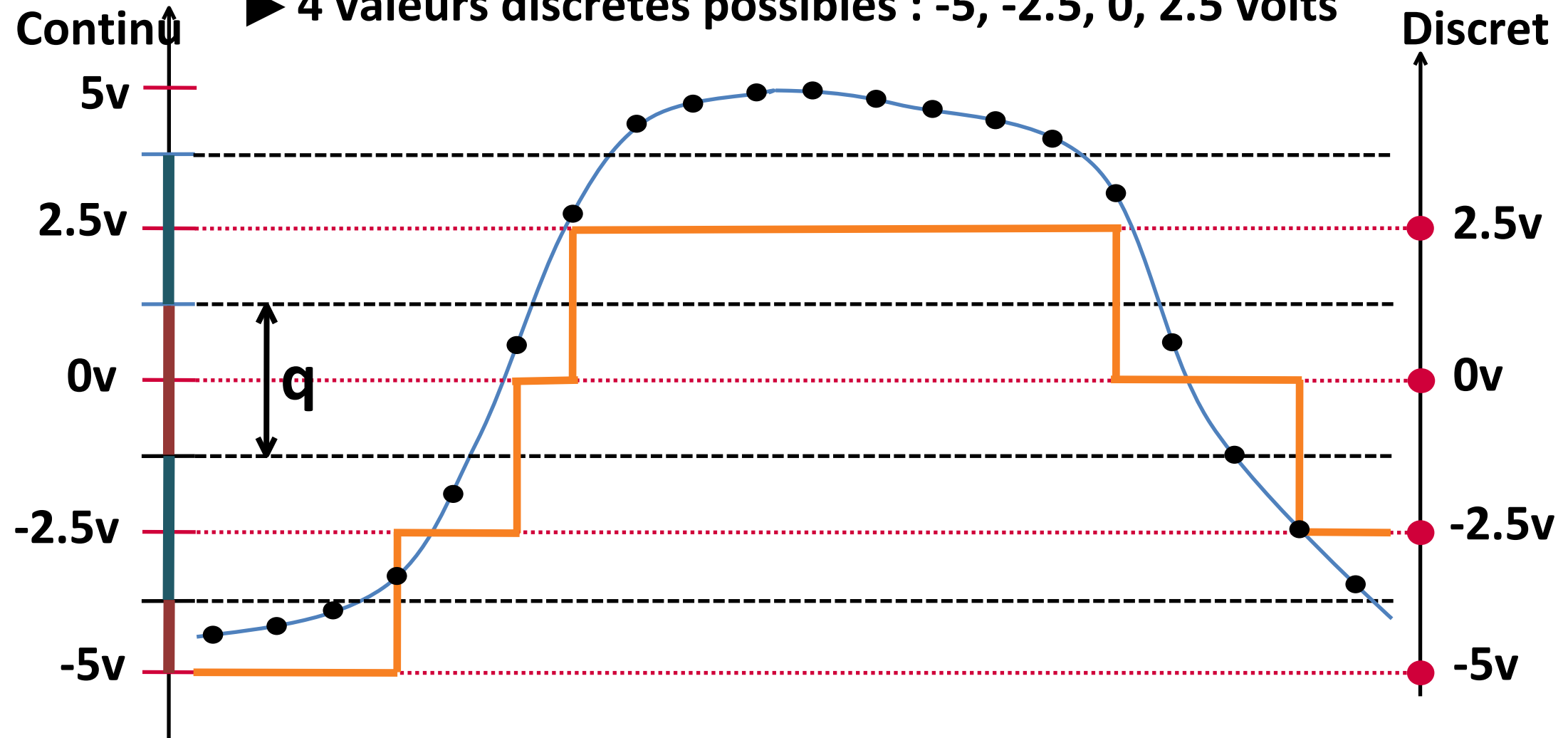
# Quantification : exemple sur 4 bits

Gamme signal d'entrée : -5 à +5 volts

► On découpe cette gamme en 4 « tranches »

► Pas de quantification  $q = 10/4 = 2.5\text{v}$

► 4 valeurs discrètes possibles : -5, -2.5, 0, 2.5 volts





A VOUS !

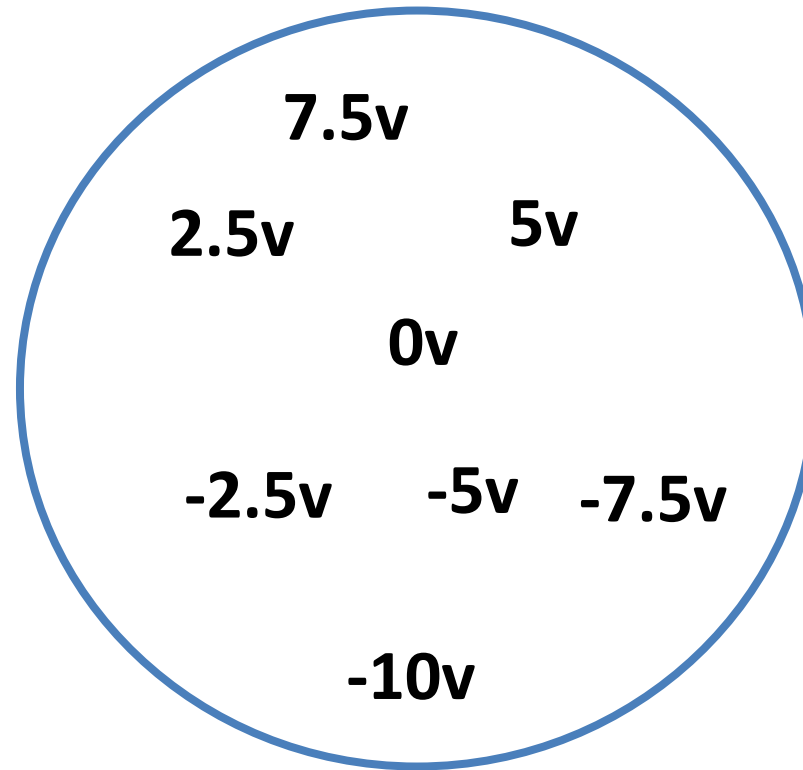
## Comment choisit-on ces valeurs discrètes ?

Un CAN accepte une tension d'entrée variant entre +10 et -10 Volts. Après échantillonnage, la quantification est faite sur un ensemble de valeurs discrètes comportant 8 éléments. Sachant que la valeur discrète 0 fait parti de cet ensemble, quelles sont les autres valeurs ?

# Les différentes étapes de cette conversion



A VOUS !



# Les différentes étapes de cette conversion



A VOUS !

**Comment sont transformées les valeurs échantillonnées?**

**Si la série des valeurs échantillonnées est la suivante :**

**3.2456 ; 4.2249 ; -8.4923 ; 0.0802**

**Quelle est la série des valeurs discrètes ?**

# Les différentes étapes de cette conversion



A VOUS !

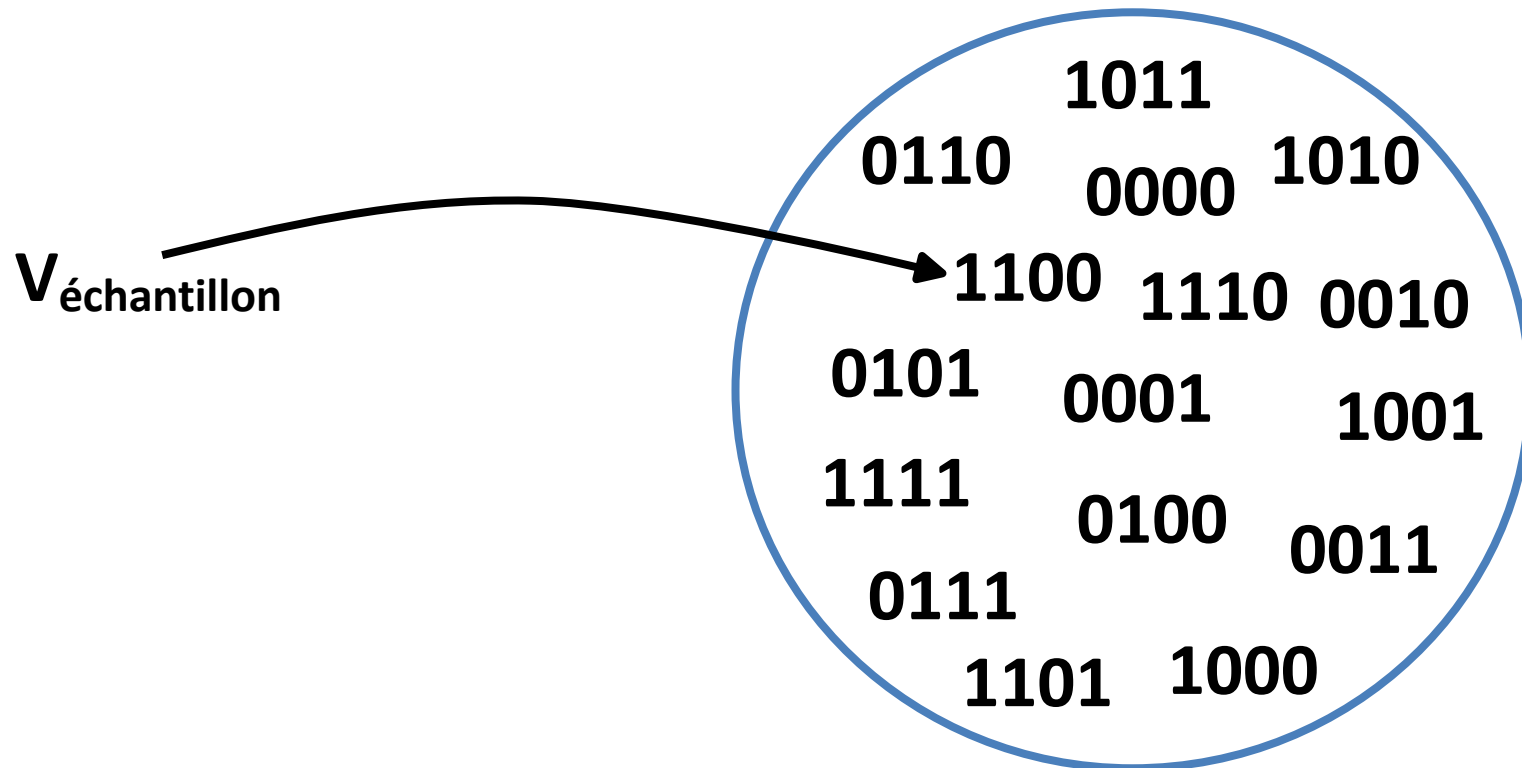
**2.5 ; 5 ; -7.5 ; 0**

# Les différentes étapes de cette conversion

## L'étape de Codage

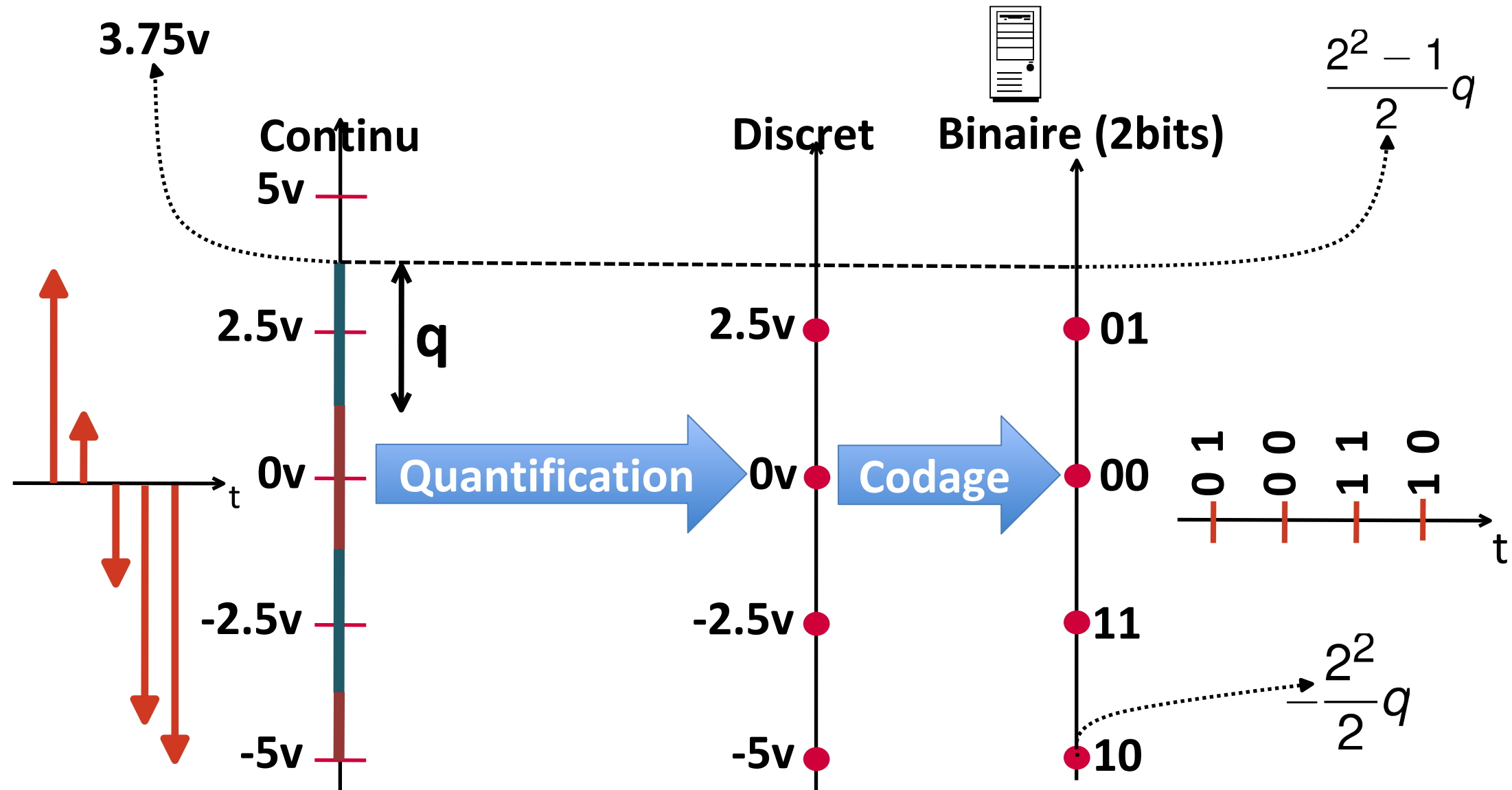
Dans la réalité le nombre d'éléments est très grand (plusieurs milliers) et chaque élément est directement codé en binaire.

C'est ce que l'on appelle le **CODAGE**





On associe un code binaire à chaque valeur discrète issue de la quantification



# Les différentes étapes de cette conversion



! AVOUS

**En partant de l'exemple précédent,  
Combien de bits sont nécessaires au  
minimum?**

**Existe-t-il plusieurs codage possibles ?**

**Quel code proposeriez-vous ?**

**Quel est le lien entre le nombre de  
valeurs discrètes et le nombre de bits  
de ces codes ?**

**Quelle est la plus petite variation décelable ?  
Quel est son lien avec le nombre de bits de ces codes ?**

# Les différentes étapes de cette conversion

**3 bits**



A VOUS !

# Les différentes étapes de cette conversion



A VOUS !

**3 bits**

**Oui**

**7.5v  $\Leftrightarrow$  011**

**5v  $\Leftrightarrow$  010**

**2.5v  $\Leftrightarrow$  001**

**0v  $\Leftrightarrow$  000**

**-2.5v  $\Leftrightarrow$  111**

**-5v  $\Leftrightarrow$  110**

**-7.5v  $\Leftrightarrow$  101**

**-10v  $\Leftrightarrow$  100**

# Les différentes étapes de cette conversion



$$8 = 2^3$$

$$2.5v$$

$$2.5v = (10 - (-10))/2^3$$

A VOUS !

# Les différentes étapes de cette conversion

## Acquisition $\Leftrightarrow$ numérisation

**Signal  
analogique**



**ECHANTILLONNAGE**



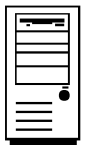
**QUANTIFICATION**



**CODAGE**



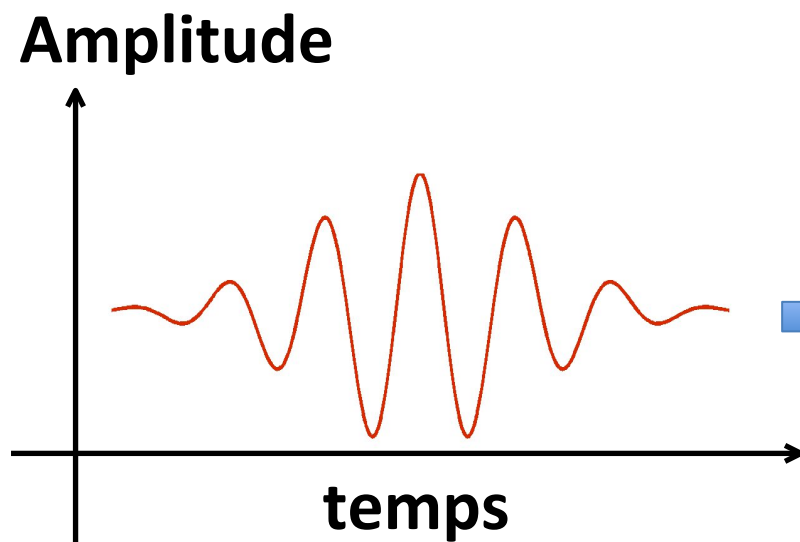
**Signal  
numérique**



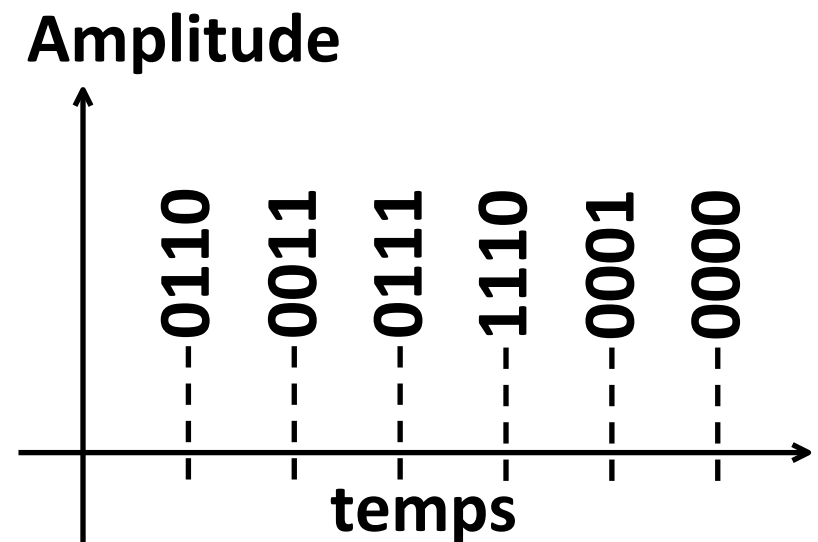
# La conversion analogique numérique

## Synthèse

La CAN permet de passer d'une représentation analogique à une représentation numérique manipulable sur ordinateur



Signal continu à  
temps continu



Signal discret à  
temps discret = Signal  
numérique

## Première partie – Signal, notions de métrologie, acquisition

- a) Présentation du concept de Signal
- b) Notions de métrologie – Capteur
- c) Du monde analogique au monde numérique : le composant
- d) Les différentes étapes de cette conversion et le théorème de Shannon-Nyquist
- e) Les caractéristiques essentielles de la Conversion Analogique/Numérique



## Temps de conversion

**C'est le temps mis par le CAN pour échantillonner le signal et délivrer son code associé (lien avec  $F_{e_{max}}$ )**

# Les caractéristiques essentielles de la CAN

## Temps de conversion

**C'est le temps mis par le CAN pour échantillonner le signal et délivrer son code associé (lien avec  $F_{e_{max}}$ )**

## Résolution

**C'est le nombre « n » de bits du CAN**

# Les caractéristiques essentielles de la CAN

## Temps de conversion

C'est le temps mis par le CAN pour échantillonner le signal et délivrer son code associé (lien avec  $F_{e_{\max}}$ )

## Résolution

C'est le nombre « n » de bits du CAN

## Le nombre de valeurs discrètes possibles

$2^n$

## Gamme de la tension d'entrée

**C'est l'intervalle de tension dans laquelle  
le signal d'entrée peut évoluer  
 $[V_{\min}, V_{\max}]$**

## Gamme de la tension d'entrée

C'est l'intervalle de tension dans laquelle  
le signal d'entrée peut évoluer  
 $[V_{\min}, V_{\max}]$

## Tension pleine échelle

C'est la longueur de la gamme de la tension d'entrée :  
 $|V_{\max} - V_{\min}|$

## Pas de quantification q (Précision)

**C'est le rapport de la tension pleine échelle au nombre de valeurs discrètes possibles :**

$$q = |V_{\max} - V_{\min}| / 2^n$$

# Les caractéristiques essentielles de la CAN

## Pas de quantification q (Précision)

**C'est le rapport de la tension pleine échelle au nombre de valeurs discrètes possibles :**

$$q = |V_{\max} - V_{\min}| / 2^n$$

## Codage

**C'est le code délivrée par le CAN**