

Les capteurs sont des éléments sensibles à des grandeurs physiques qu'ils transforment en grandeur électrique (en général une tension). Ils sont souvent intégrés à chaîne d'acquisition permettant à la grandeur mesurée d'être conditionnée afin que la mesure (ou signal de sortie) donne une estimation optimisée du mesurande.

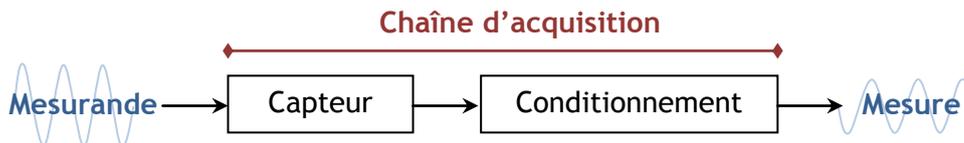


Figure 1 : Schéma de la chaîne d'acquisition d'une mesure

Cette ressource a pour objectifs de présenter les principes généraux des capteurs et de leurs chaînes d'acquisition. Quelques exemples de capteurs sont donnés, dont les caractéristiques générales sont présentées.

## 1 – Introduction

### 11 - Le mesurande, grandeur physique à mesurer

Une mesure est une représentation quantifiée d'une grandeur physique (température, pression, champ magnétique ...). On définit la terminologie suivante :



- Mesurande : grandeur physique soumise à un mesurage (pression, température, ...),
- Mesurage : toutes les opérations permettant l'obtention de la valeur d'une grandeur physique (mesurande),
- Mesure : valeur numérique représentant le mesurande ( $6 \text{ MPa}$ ,  $20^\circ \text{C}$ ,  $2 \text{ m.s}^{-1}$  ...).

Il est à noter qu'il est possible de réaliser des capteurs permettant de mesurer des grandeurs dérivées de la grandeur physique à laquelle ils sont sensibles (vitesse, contrainte mécanique, position ...)

### 12 - La chaîne d'acquisition

La chaîne d'acquisition a pour fonction de recueillir et transformer la grandeur à mesurer sous une forme adaptée à son exploitation. Le capteur peut à la fois réaliser la mesure et faire partie du conditionnement (comme dans un montage en pont de Wheatstone) ou bien être dissocié (comme schématisé figure 1).

Prenons l'exemple d'une mesure de température  $T$  via une thermistance, dipôle résistif dont la résistance électrique  $R$  (figure 2a) varie en fonction la température  $R(T) = R_0 + \Delta R(T)$ . La mesure directe de la tension  $V$  inclut deux termes : une composante continue  $V_0$  et une variation de tension due à la variation de température,  $V = V_0 + \Delta V$ . Il est possible de réaliser la mesure de température via la tension aux bornes d'une seule thermistance mais cette méthode présente des

inconvenients, en particulier celui de délivrer un signal de sortie dont seule une faible proportion est dépendante du mesurande.

Il est préférable de réaliser la mesure au moyen d'un montage de type pont de Wheatstone qui permet de n'extraire que la variation de signal dépendante du mesurande (température). Quatre résistances y sont montées en pont (figure 2b). Le fonctionnement du montage repose sur le simple principe du pont diviseur de tension. A l'équilibre (température de référence) les quatre résistances sont égales et la tension de sortie  $V_s$  est nulle. Le montage ne comporte qu'une seule résistance qui soit sensible à la température. Sa variation  $\Delta R(T)$  entraîne une variation de la tension de sortie  $V_s$  :

$$V_s = \frac{I}{4} \Delta R(T) \frac{1}{1 + \frac{\Delta R(T)}{4R_0}}$$

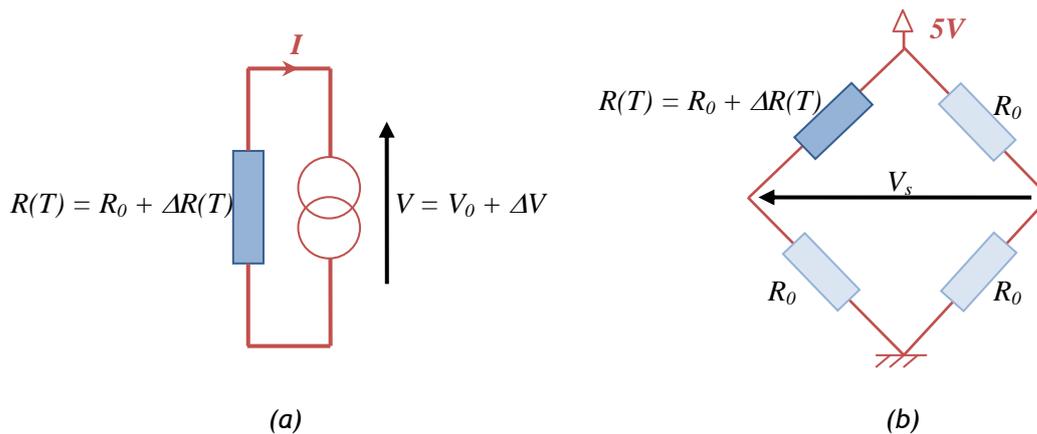


Figure 2 : (a) montage d'une résistance seule, (b) montage en pont de Wheatstone

La chaîne d'acquisition peut assurer plusieurs rôles par le truchement de divers dispositifs. Le capteur, placé en tête de la chaîne d'acquisition, transforme le mesurande en signal électrique (en général une tension). Le circuit de conditionnement optimise les caractéristiques du signal de sortie du capteur (filtrage du bruit, amplification, suppression de composante continue...). Une conversion analogique/numérique du signal peut également être faite afin par exemple de rendre la mesure exploitable par un ordinateur.

## 2 - Les capteurs

Premier élément de la chaîne d'acquisition, le capteur a pour fonction de délivrer un signal électrique de sortie  $s$  fonction du mesurande  $m$ , autrement dit il transforme la mesure de la grandeur physique en grandeur électrique  $s(m)$ . Il est à noter que certains capteurs sont passifs (i.e. fonctionnent sans alimentation électrique) et d'autres actifs (nécessitent une alimentation électrique).

### 21 - Quelques exemples de capteurs

#### Capteur de champ magnétique à effet Hall

Un capteur de Hall est un capteur de champ magnétique  $B$  (figure 3) qui consiste en un barreau de semi conducteur alimenté par un courant  $I$  (c'est donc un capteur actif). Sous l'effet du champ à mesurer divers phénomènes entrent en jeu (force de Lorentz, champ de Hall consécutif, ...) et il apparaît entre les faces supérieure et inférieure du barreau une tension  $V_H$  proportionnelle à  $B$  qui constitue le signal de sortie.

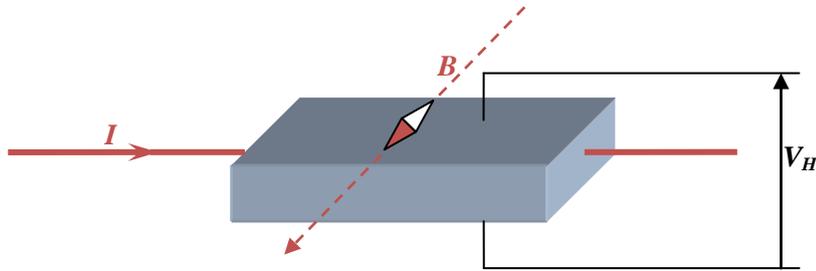


Figure 3 : Schéma de principe d'un capteur à effet Hall

### Capteur de contrainte mécanique à effet piézoélectrique

Un capteur piézoélectrique permet de mesurer des déformations et contraintes mécaniques. Il consiste en un barreau de matériau piézoélectrique : soumis à une déformation, une tension apparaît à ses bornes. C'est la mesure de cette dernière qui permet de déterminer la grandeur mécanique.

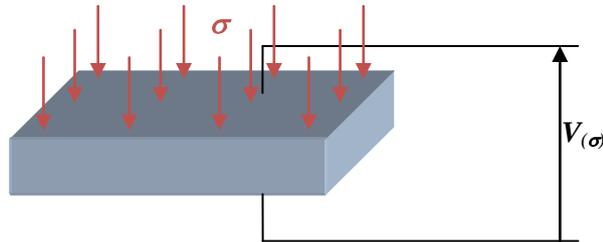


Figure 4 : Schéma de principe d'un capteur piézoélectrique

### Thermistance

Une thermistance est un dipôle résistif dont la résistance électrique  $R$  dépend de la température  $T$ . On l'utilise comme capteur de température en exploitant la loi d'Ohm. Un montage en pont de Wheatstone est généralement mis en œuvre pour conditionner le signal (voir chapitre 12).

### Magnétorésistance

Un capteur magnétorésistif est un dipôle résistif dont la résistance électrique  $R$  dépend du champ magnétique  $B$ . On l'utilise comme capteur de champ magnétique en exploitant la loi d'Ohm.

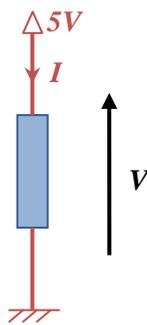


Figure 5 : Schéma de principe d'un capteur magnétorésistif

On voit qu'un capteur donné repose sur l'exploitation d'un certain phénomène physique et sur un certain mode de mise en œuvre qui lui permettent de transformer le mesurande en une grandeur électrique.

Par exemple, une magnétorésistance est un dipôle électrique passif dont la résistance  $R$  varie en fonction du champ  $B$  dans lequel elle est plongée. La mise en œuvre du capteur pour mesurer  $B$  à partir de  $R$  repose sur la loi d'Ohm : on injecte un courant et on mesure la tension à ses bornes. En présence d'un champ  $B$ ,  $R$  varie de  $\Delta R$  et  $V$  de  $\Delta V$ . La mesure de  $\Delta V$  permet de déduire  $B$ .

## 22 - Caractéristiques déterminantes dans le choix d'un capteur

Pour une application donnée, il est fréquent que plusieurs technologies de capteur puissent convenir. Leur choix dépendra des performances visées en termes de caractéristiques de mesure, dont les principales sont définies ci-après.

**Etendue de mesure :** ( $E.M.$ ) différence entre la valeur minimale  $m_{min}$  et maximale  $m_{max}$  du mesurande à obtenir :  $E.M. = m_{max} - m_{min}$ . L'étendue de mesure est définie par la courbe d'étalonnage du capteur (figure 6) qui à chaque valeur du mesurande  $m$  fait correspondre un signal de sortie  $s$  unique.

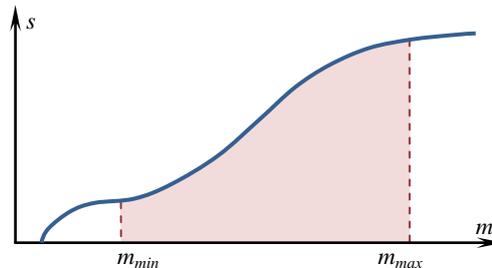


Figure 6 : Etendue de mesure d'un capteur

**Dynamique de mesure :** C'est la différence entre les valeurs extrêmes mesurables par le capteur pour une marge d'erreur fixée. Les mesures ne sont pas entachées d'une erreur supérieure à celle tolérée, elles sont données avec la notion de précision.

**Résolution :** Plus petite valeur que le capteur est en mesure d'identifier. La résolution est dépendante du niveau de bruit.

**Sensibilité :** Facteur de proportionnalité entre le signal de sortie du capteur  $s$  et la grandeur mesurée. Pour une valeur donnée  $m$  du mesurande, la sensibilité  $S(m)$  du capteur est égale au rapport entre la variation de la sortie électrique et la variation du mesurande :

$$S(m) = \left( \frac{\Delta s}{\Delta m} \right)_m$$

Si  $s(m)$  est, dans l'étendue de mesure, une fonction linéaire du mesurande  $m$ , le capteur est dit linéaire. Sa sensibilité  $S(m)$  est alors constante sur l'étendue de mesure (figure 7).

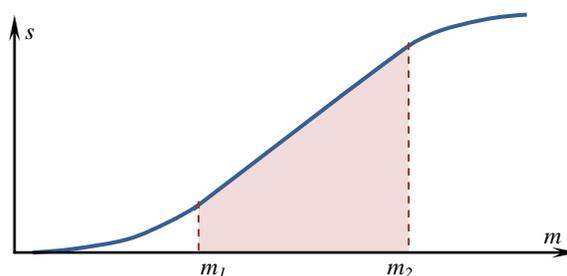


Figure 7 : Domaine de linéarité d'un capteur

**Précision :** L'incertitude sur chaque résultat de mesure  $M$  doit être quantifiée par une estimation de l'erreur possible exprimée par  $\pm \delta M$ . On sait alors que  $m = M \pm \delta M$ . L'erreur de précision est une erreur relative  $\varepsilon_p$  ramenée à l'étendue de mesure :

$$\varepsilon_p = \frac{\delta M}{E.M.}$$

**Bande passante** : Gamme de fréquence pour laquelle le capteur fonctionne. Elle est caractéristique de la rapidité du capteur. La rapidité est la capacité de réponses aux variations du mesurande dans le temps.

**Dérives et paramètres d'influence** : Diverses grandeurs physiques ( $g_i$ ) autres que le mesurande  $m$ , sont susceptibles d'influencer la mesure  $M$  faite par le capteur :  $M = f(m, g_1, g_2, \dots)$ . Il peut s'agir par exemple de la température ambiante, de vibrations, d'humidité mais aussi de perturbations électromagnétiques ... Il est possible d'en tenir compte dans le mesurage en réalisant en parallèle une mesure de certaines grandeurs d'influence, ou de s'en protéger (suspension antivibratoire, blindage électromagnétique ...) ou encore de les compenser par la chaîne d'acquisition avec une électronique adaptée.

D'autres caractéristiques sont importantes dans le choix d'un capteur, citons le coût, l'encombrement, sa facilité de mise en œuvre.

### 23 - Caractéristiques liées aux erreurs de mesure

Les mesures faites par un capteur sont généralement sujettes à une imprécision. La différence entre la valeur réelle du mesurande et la mesure est appelée erreur de mesure. On peut distinguer deux types d'erreurs : les erreurs systématiques et les erreurs accidentelles (figure 8).

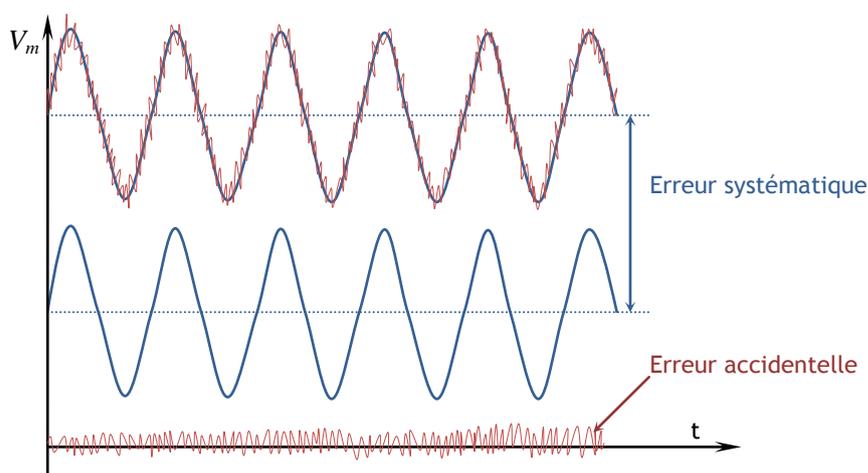


Figure 8 : Illustration des deux types d'erreurs (systématique et accidentelle)

Les erreurs systématiques ont plusieurs origines possibles. Elles proviennent d'une erreur dans la courbe d'étalonnage, d'une valeur erronée d'une grandeur de référence, d'une correction erronée apportée aux mesures ou encore d'un écart à la linéarité du capteur supposé linéaire. Les erreurs systématiques introduisent un même décalage que l'on peut éventuellement réduire par ré-étalonnage.

Les erreurs accidentelles peuvent être dues à une lecture erronée d'un appareil à déviation, d'une erreur de mobilité (capteur insensible à certaine variation du mesurande), aux bruits de l'environnement (thermique, amplificateurs de l'électronique de conditionnement...), aux fluctuations des tensions d'alimentation ... Leur réduction passe par une amélioration des dispositifs de la chaîne d'acquisition, ou le post-traitement du signal.

Trois caractéristiques métrologiques définissent les erreurs de mesure : la justesse, la fidélité et la précision (figure 9).

La justesse est la qualité d'un capteur dont les erreurs systématiques sont faibles. Un capteur juste est un capteur dont la valeur moyenne de mesures répétées ( $V_{moy}$ ) correspond à la valeur vraie du mesurande ( $V_m$ ).

La fidélité est la qualité d'un capteur dont les erreurs accidentelles sont faibles. Il donne des résultats peu dispersés autour de la valeur moyenne ( $V_{moy}$ ). On dit également que les mesures sont reproductibles.

Enfin la précision est la qualité d'un appareil dont chaque mesure est proche de la valeur réelle du mesurande. Il est donc à la fois fidèle et juste.

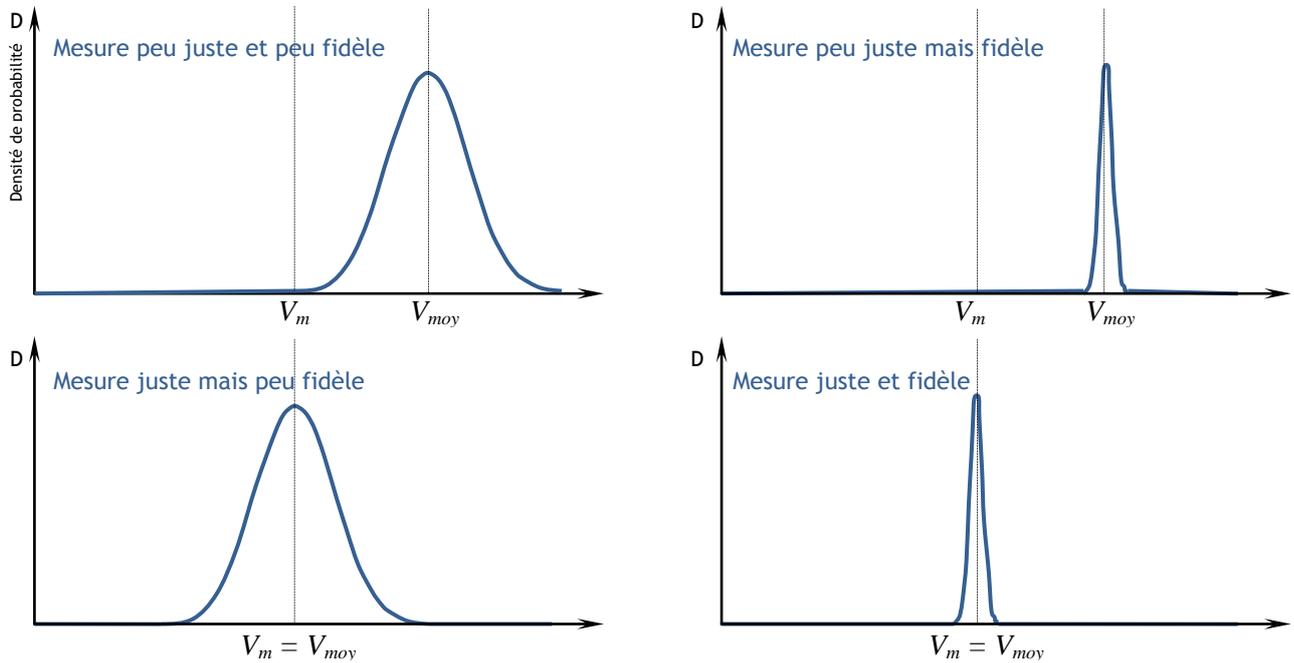


Figure 9 : Illustration des notions de fidélité et justesse

### 3 – Conditionnement des signaux

Le conditionnement permet de mettre en forme le signal mesuré en vue d'un traitement et d'une transmission éventuelle. Il ne s'agit pas ici de faire un bilan exhaustif des conditionnements associés aux capteurs mais d'en donner quelques exemples.

#### 31 - Conversion courant-tension

Lorsque le signal de sortie du capteur est un courant, le rôle du convertisseur courant-tension est de transformer celui-ci en une tension. Le montage (figure 10) est réalisé de telle sorte qu'aucun courant ne parcourt  $R_c$ , et que tout le courant fourni par la source  $i(m)$  représentant le courant à convertir traverse  $R$  et détermine la tension de sortie :  $v_{out} = -R.i(m)$

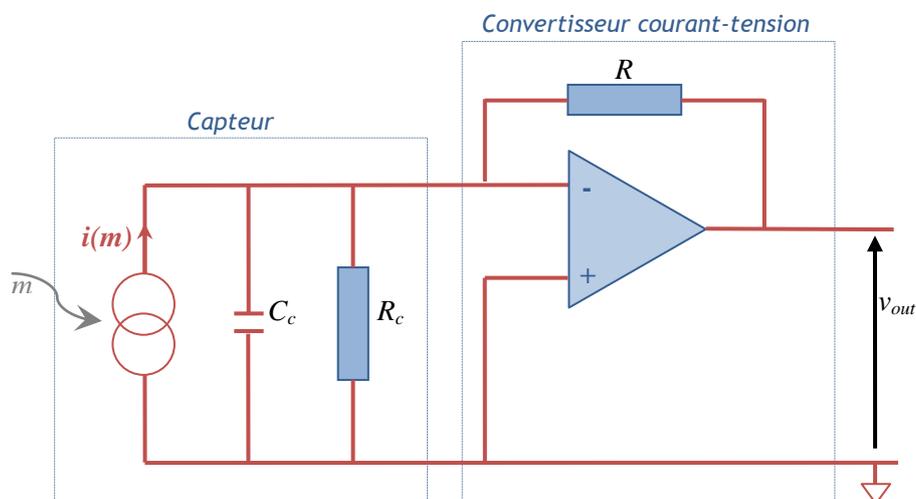


Figure 10 : Capteur générant un courant associé à un convertisseur courant-tension à amplificateur opérationnel

## 32 - Amplification

Lorsque les signaux électriques issus des capteurs sont de faible amplitude, il peut être nécessaire de les amplifier pour les adapter à la chaîne de transmission. Il faut savoir que l'amplification (en tension ou en puissance) du signal électrique issu du capteur est un phénomène bruyant : elle s'accompagne d'une dégradation du rapport signal sur bruit. Cela signifie que si l'amplitude du signal utile issue du capteur se trouve augmentée, les parasites (bruit) le sont également mais dans des proportions plus grandes encore.

Les amplificateurs d'instrumentation sont conçus de manière à optimiser le rapport signal sur bruit, c'est à dire à « peu » le dégrader. Ils sont caractérisés par un gain d'amplification (en tension ou en puissance) ratio du signal électrique de sortie de l'amplificateur sur le signal d'entrée, ainsi que par un facteur fruit  $F > 1$  qui quantifie la dégradation du rapport signal sur bruit entre l'entrée et la sortie.

## 33 - Filtrage

Le filtrage peut avoir différentes applications. Il peut en particulier être pratiqué afin de réduire le bruit (signal parasite « large bande » ou haute fréquence) entachant le signal utile. Ainsi un filtrage passe-bas éliminera le bruit haute fréquence et produira un effet de lissage utile.

Placé avant l'échantillonnage de la conversion analogique/numérique (voir chapitre 4) le filtre d'entrée appelé filtre anti-repliement, contraint le signal à avoir un spectre limité tel que  $f_{max} < f_e/2$ . Placé en sortie de la conversion analogique/numérique, le filtrage lisse le signal de sortie pour restituer le signal utile.

## 4 – Conversion analogique/numérique

La conversion analogique/numérique consiste à transformer la tension analogique (issue du capteur) en un code binaire (numérique) adapté à son exploitation dans un processus de régulation, de contrôle, de calculs ou encore de stockage. La conversion analogique/numérique n'est pas systématique, un stockage ou une régulation pouvant également être réalisés à partir de données analogiques.

Le Convertisseur Analogique Numérique (CAN) transforme le signal analogique, signal continûment variable pouvant prendre une infinité de valeurs, en un signal numérique, signal discontinu pouvant être représenté aux moyens de données binaires (0 et 1). La conversion analogique/numérique comporte deux étapes, l'échantillonnage et la conversion proprement dite. L'échantillonnage est une opération qui doit satisfaire un juste équilibre entre précision et rapidité.

La rapidité à laquelle sont prélevés les échantillons doit permettre une reconstruction fidèle du signal, elle est représentée par la fréquence d'échantillonnage  $f_e$  qui doit être suffisamment grande pour retranscrire les variations rapides du signal (figure 11). Le théorème d'échantillonnage aussi dénommé théorème de Shannon-Nyquist, permet de déterminer la fréquence d'échantillonnage d'un signal donné. Il énonce que la reconstruction d'un signal de sortie fidèle au signal d'entrée, requiert de choisir une fréquence d'échantillonnage qui soit au moins deux fois supérieure à la fréquence maximale contenue dans le signal d'entrée, soit :

$$f_e \geq 2.f_{max}.$$

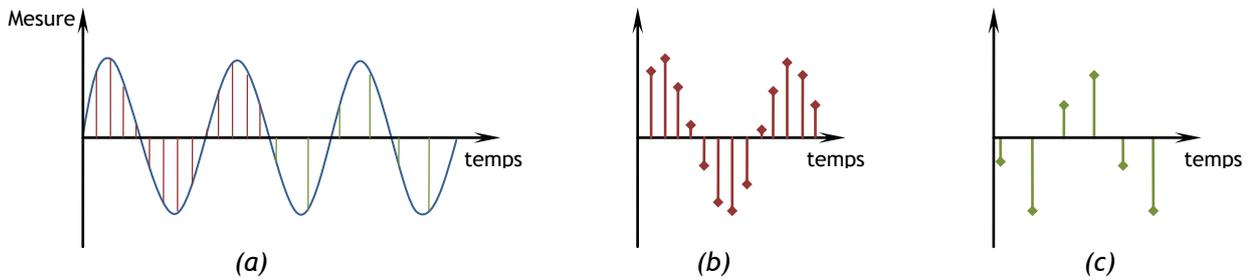


Figure 11 : Echantillonnages d'un signal de mesure (a) avec une fréquence d'échantillonnage plus élevée dans le cas (b) que le cas (c),  $f_{e_b} > f_{e_c}$

La précision du codage du signal numérique dépend du nombre de bits sur lequel s'effectue ce codage. Chaque peut prendre 2 valeurs (0 ou 1), un codage sur 2 bits peut prendre 4 valeurs, un codage sur n bits peut prendre  $2^n$  valeurs (figure 12).

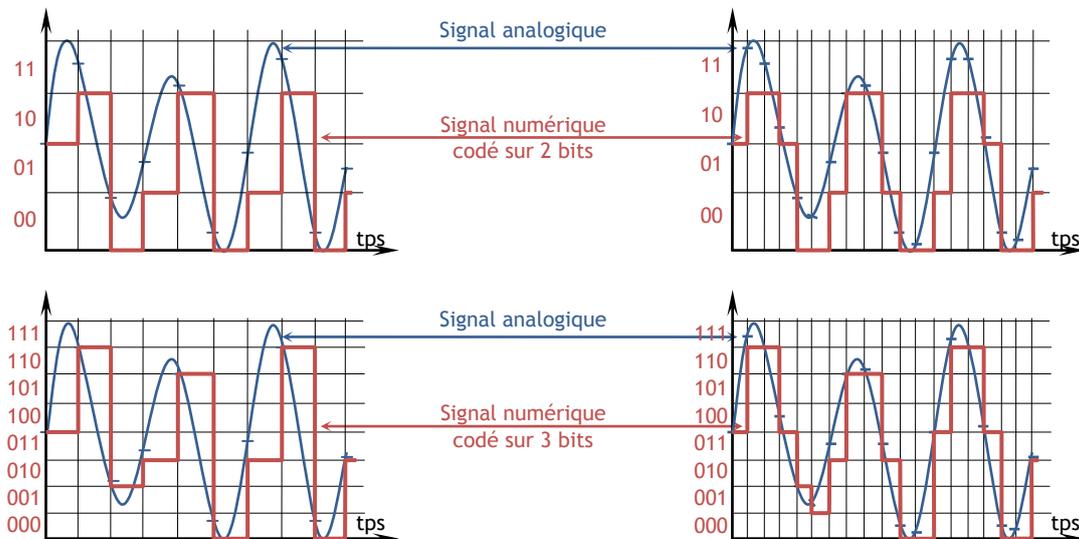
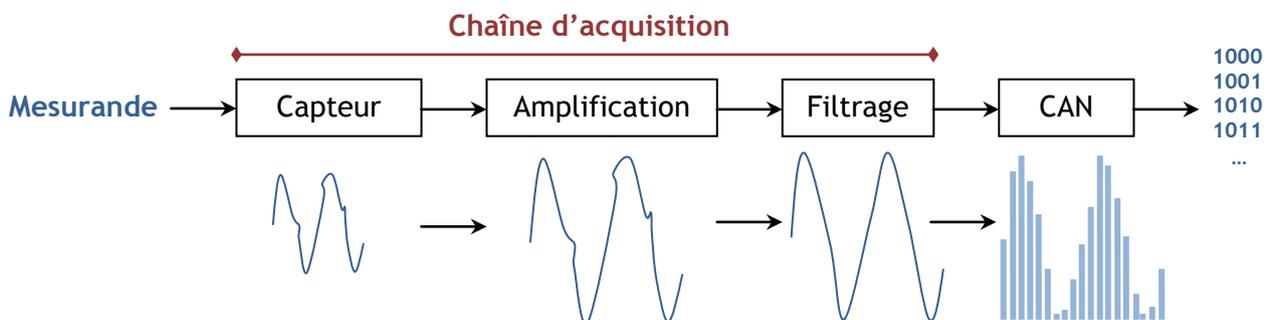


Figure 12 : Représentations de codages d'un signal sur 2 et 3 bits et avec 2 échantillonnages

## 5 – La chaîne d'acquisition

L'association capteur-conditionneur détermine les caractéristiques du signal de sortie. La chaîne d'acquisition doit être considérée dans son ensemble, ses caractéristiques sont déterminées de manière à répondre à l'application visée. Les divers dispositifs constituant la chaîne d'acquisition et sa structure doivent permettre le mesurage, le traitement et la restitution de la mesure avec les caractéristiques nécessaires à l'application : résolution, précision, rapidité et immunité aux parasites.



### Référence :

[1]: G. Asch et collaborateurs. Acquisition de données, du capteur à l'ordinateur. Edition Dunod

Ressource publiée sur EDUSCOL-STI : <http://eduscol.education.fr/sti/si-ens-cachan/>