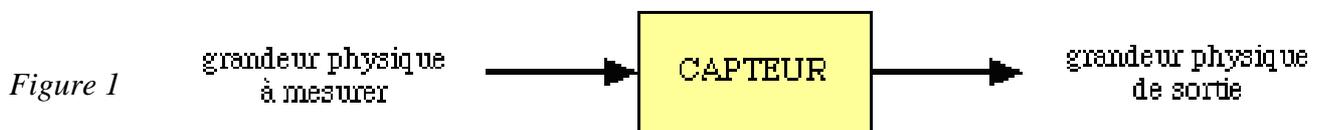


# Les capteurs et la chaîne d'acquisition

## 1. Les capteurs

Dans de nombreux domaines (industrie, recherche scientifique, services, loisirs, ...), il est nécessaire de contrôler de nombreuses **grandeurs physiques** (débit, déplacement, force, pression, température, vitesse, ...) afin de les **traiter** et de les **exploiter**. Pour cela, on mesure cette grandeur physique et on la traduit en une autre grandeur physique de nature différente facilement exploitable. On fait alors appel à ce que l'on nomme "**capteur**" (figure 1).

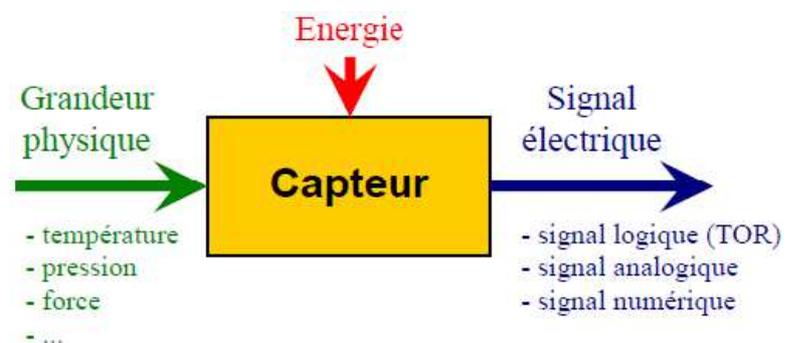


Le **capteur** est l'élément indispensable à la détection de grandeurs physiques. Son rôle est de donner une image interprétable d'un phénomène physique de manière à pouvoir l'intégrer dans un processus plus vaste.

### 1.1. Les différentes familles de capteurs

De nos jours, compte tenu des possibilités offertes par l'électronique et l'informatique, les capteurs délivrent souvent un signal **électrique** (figure 2) et la quasi-totalité des chaînes d'acquisition sont des chaînes **électroniques** et **informatiques**.

Figure 2 : Un capteur fournit souvent un signal électrique de type logique (TOR), analogique ou numérique



Le plus souvent, les capteurs fournissent un signal **analogique**. Ce signal analogique peut être utilisé telle quelle ou **numérisée** par un convertisseur analogique - numérique (CAN) pour son utilisation future. D'autres capteurs donnent un signal logique **tout ou rien** (TOR) (exemple : présence d'un objet en un lieu, niveau atteint par un liquide dans une cuve, ...).

Les capteurs peuvent être classés en **3 groupes** en fonction de la **nature de l'information** délivrée en sortie (figure 2).

- **Les capteurs logiques ou Tout Ou Rien (TOR)**

Type de signal de sortie : Le signal varie de façon **discrète** au cours du temps (figure 3).

**Deux niveaux** logiques sont autorisés :  
**niveau "bas"**, représenté par le nombre binaire "0" (0 V) ou **niveau "haut"**, représenté par le nombre binaire "1" (tension d'alimentation : 3 V, 5 V, ...)

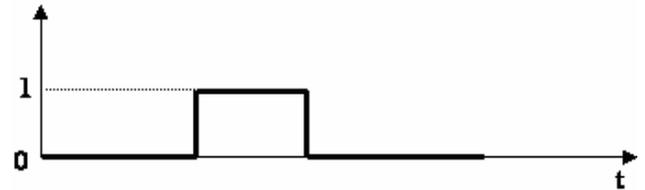


Figure 3 : Signal logique

L'information est donc transférée par un signal binaire ("0" ou "1") dit **tout ou rien** (TOR).

Ces capteurs portent souvent le nom de **détecteurs**.

- **Les capteurs analogiques**

Type de signal de sortie : Le signal est une fonction **continue** du temps (figure 4).

*Exemple* : 0 – 10 V ou 4 – 20 mA

La plupart des grandeurs physiques (pression, température, ...) varient de manière analogique.

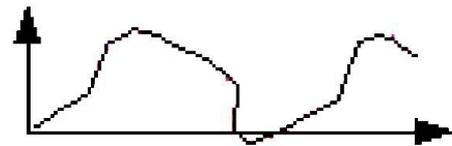


Figure 4 : Signal analogique

Un signal analogique présente l'avantage d'être une **image directe** de la grandeur physique.

Par contre ces signaux sont difficiles à mémoriser et à traiter mathématiquement.

- **Les capteurs numériques**

Type de signal de sortie : Le signal est un **"mot binaire"** constitué par un ensemble de signaux logiques (figure 5).

*Exemple* : un mot binaire de 4 **bits** est constitué de 4 signaux logiques ne pouvant prendre que les valeurs "0" ou "1" (0000, 0001, 0010, ...).

Un signal numérique n'est pas une image directe de la grandeur physique mais un **"codage"** plus difficile à appréhender. Par contre ces signaux peuvent être facilement mémorisés et traités.

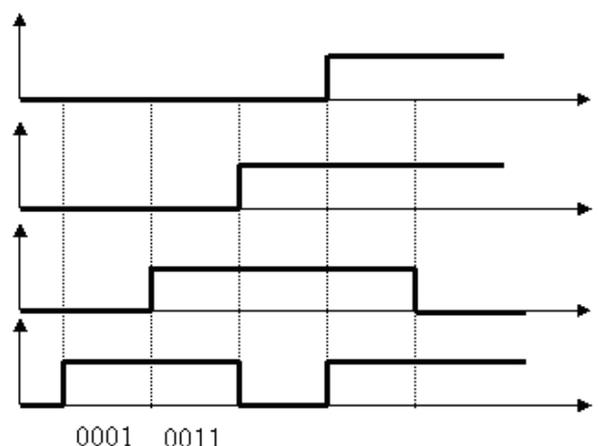


Figure 5 : Signal numérique

## 1.2. Définitions

**Mesurande ( $m$ )** : Le **mesurande** est la grandeur physique faisant l'objet de la mesure : débit, déplacement, force, pression, température, vitesse, ... Le mesurande est la grandeur d'entrée du capteur, la grandeur de sortie du capteur est l'image du mesurande.

**Grandeur de sortie ou réponse du capteur ( $s$ )** : La **grandeur de sortie** ou la réponse du capteur est l'information délivrée par le capteur. Elle est fonction du mesurande :

$$s = f(m)$$

$s$  est la grandeur de sortie ou réponse du capteur,  $m$  est la grandeur d'entrée ou mesurande (figure 6).

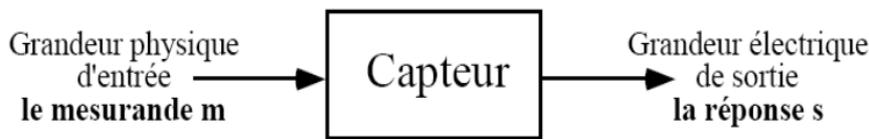


Figure 6

### Remarque :

La relation  $s = f(m)$  découle des lois physiques qui régissent le fonctionnement du capteur, de sa construction pratique (dimensions matériaux, ...) et éventuellement de son environnement et de son mode d'emploi (température, alimentation, ...).

Pour tout capteur, la relation  $s = f(m)$  résulte d'un **étalonnage**.

❶ Pour un ensemble de valeurs de  $m$  connues avec précision, on mesure les valeurs correspondantes de  $s$  ce qui permet de tracer la courbe  $s = f(m)$  appelée **courbe d'étalonnage** du capteur.

❷ La courbe d'étalonnage permet d'associer à toute valeur mesurée de  $s$ , la valeur de  $m$  inconnue (figure 7).

⇒ la mesure de  $s$  permet de déduire la valeur de  $m$ , graphiquement ou par modélisation mathématique.

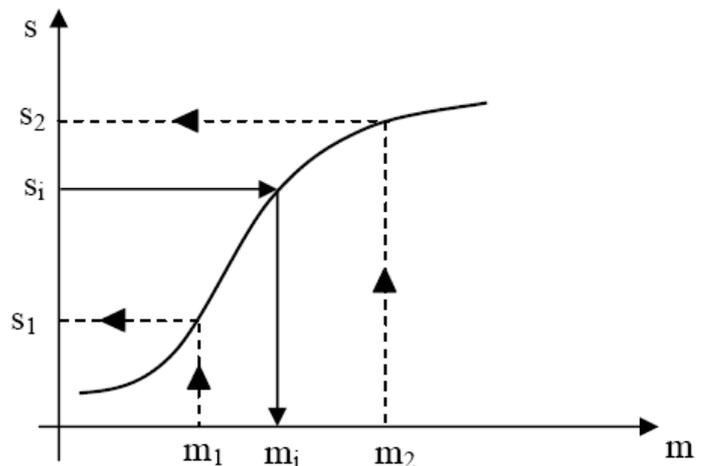


Figure 7 : Courbe d'étalonnage d'un capteur

1) Son établissement : à partir de valeurs connues du mesurande  $m$

2) Son exploitation : à partir des valeurs mesurées de la réponse  $s$  du capteur

**Sensibilité (S)** : La **sensibilité** d'un capteur se définit, autour d'une valeur  $m_i$  constante du mesurande, comme le rapport d'une petite variation de la sortie  $\Delta s$  par une petite variation

de l'entrée  $\Delta m$  qui lui a donné naissance :

$$S = \frac{\Delta s}{\Delta m}$$

Remarques :

- Lorsque la grandeur de sortie et la grandeur d'entrée sont de même nature, la sensibilité est alors sans dimension et peut être appelée **gain**.
- La sensibilité d'un capteur, si elle constante, est une qualité appréciée. On dit dans ce cas que le capteur est **linéaire**. Il y a alors simple proportionnalité entre la variation du mesurande et la variation de la grandeur de sortie, indépendamment de la valeur du mesurande.
- Un des problèmes importants dans la conception et l'utilisation d'un capteur est la constance de sa sensibilité  $S$  qui doit dépendre aussi peu que possible :
  - ✓ de la valeur de  $m$  (**linéarité**), du temps (**vieillesse**),
  - ✓ de l'action d'autres grandeurs physiques de l'environnement du capteur qui ne sont pas l'objet de la mesure et que l'on désigne comme **grandeurs d'influence** (température, humidité, vibrations, ...),
  - ✓ ...

**Étendue de mesure (E.M.)** : L'**étendue de mesure** d'un capteur est l'intervalle des valeurs du mesurande à l'intérieur duquel le fonctionnement du capteur satisfait à des spécifications données. La valeur maximale définit la **pleine échelle (P.E.)**, cette valeur reste bien entendu inférieure à la valeur maximale de non-détérioration.

**Résolution ( $R_s$ )** : La **résolution** d'un capteur se définit comme la plus petite valeur de variation du mesurande donnant une réponse significative du capteur.

### 1.3. Capteurs actifs et capteurs passifs

En tant qu'élément de circuit électrique, le capteur se présente, vu de sa sortie :

- soit comme un **générateur**,  $s$  étant une tension ou un courant : le capteur est dit **actif**,
- soit comme un **récepteur**,  $s$  étant alors une résistance, une capacité, une inductance, ... : le capteur est dit **passif**.

Dès qu'il est alimenté, un capteur actif est une source et délivre **immédiatement** un signal électrique. Il n'en est pas de même d'un capteur passif dont les variations ne sont mesurables que par les modifications du courant ou de la tension qu'ils entraînent dans un circuit électrique par ailleurs alimenté par une source extérieure. Le montage électrique nécessairement associé à un capteur passif constitue son **conditionneur de signal** et c'est l'ensemble du capteur et du conditionneur qui est la source du signal électrique.

Cette distinction entre capteurs actifs et passifs traduit en réalité une différence fondamentale dans la nature même des phénomènes physiques mis en jeu.

### a) Capteurs actifs

Un capteur actif fonctionne en **générateur**. Il est fondé dans son principe sur un effet physique (effet thermoélectrique, effet photoélectrique, effet piézoélectrique, ...) qui assure la conversion en énergie électrique de la forme d'énergie propre au mesurande : énergie thermique, énergie de rayonnement, énergie mécanique, ...

### b) Capteurs passifs

Un capteur passif fonctionne en **récepteur**. Pour ces capteurs, le mesurande  $m$  agit sur le constituant (résistor, condensateur, bobine, interrupteur, bouton poussoir, ...) du capteur, dont l'un des paramètres déterminants est sensible au mesurande.

Dans l'expression littérale de la résistance, de la capacité ou de l'inductance, sont présents des termes liés (*tableau 1*) :

- d'une part à sa **géométrie** et à ses **dimensions**
- d'autre part aux propriétés électriques des matériaux : **résistivité**  $\rho$ , **permittivité électrique**  $\varepsilon$ , **perméabilité magnétique**  $\mu$ .

Tableau 1

	<p>Résistance <math>R</math> :</p> $R = f(\rho, \ell, s)$ <p><math>\rho</math> résistivité, <math>\ell</math> longueur, <math>s</math> section</p>
	<p>Capacité <math>C</math> :</p> $C = f(S, e, \varepsilon)$ <p><math>S</math> surface des armatures, <math>e</math> distance entre armatures, <math>\varepsilon</math> permittivité</p>
	<p>Inductance <math>L</math> :</p> $L = f(\ell, S, \mu, n)$ <p><math>\ell</math> longueur, <math>S</math> surface d'une spire, <math>n</math> nombre de spires, <math>\mu</math> perméabilité</p>

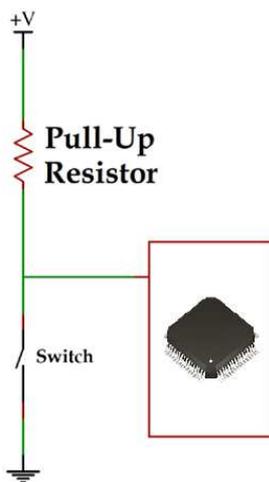
La variation d'un paramètre du capteur peut donc être due à l'action du mesurande :

- soit sur les caractéristiques *géométriques* ou *dimensionnelles*,
- soit sur les propriétés *électriques* des matériaux,
- soit plus rarement sur les deux simultanément.

Exemple :

Une mesure de résistance soumise à une variation de température permettra de déterminer, via la variation de la résistivité  $\Delta\rho$ , la valeur de la variation  $\Delta T$  de température correspondante.

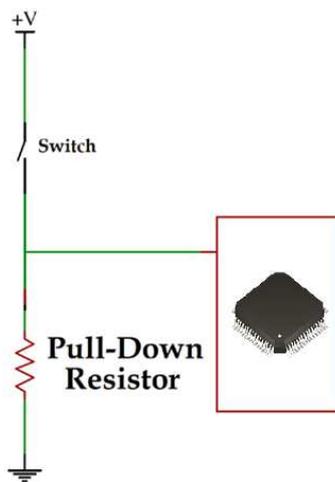
Les capteurs passifs nécessitent une intégration dans un circuit électrique ou électronique alimenté par une source d'énergie auxiliaire : c'est son *conditionneur de signal*. Les conditionneurs les plus fréquemment utilisés sont le *montage Pull-Up*, le *montage Pull-Down* et le *montage "pont diviseur de tension"* (figure 8).



a) Montage Pull-Up

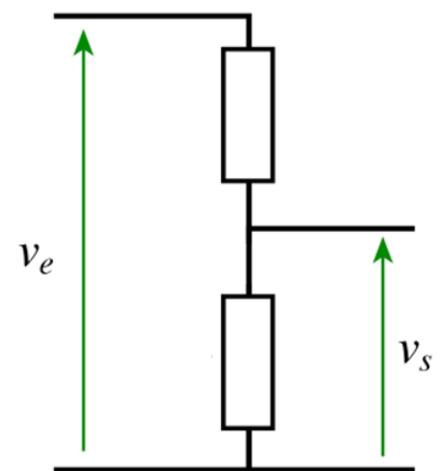
Lorsqu'un interrupteur ou un bouton poussoir est utilisé comme entrée à un circuit logique, une résistance de tirage est nécessaire pour ne pas laisser flottante l'entrée du circuit. La résistance de tirage sert dans ce cas-ci à imposer le niveau haut tandis que l'interrupteur peut imposer un niveau bas.

Sans résistance de tirage, l'entrée serait flottante et ainsi donc à un niveau logique indéfini ce qui pourrait causer un fonctionnement instable du circuit.



b) Montage Pull-Down

Lorsqu'un interrupteur ou un bouton poussoir est utilisé comme entrée à un circuit logique, une résistance de tirage est nécessaire pour ne pas laisser flottante l'entrée du circuit. La résistance de tirage sert dans ce cas-ci à imposer le niveau bas tandis que l'interrupteur peut imposer un niveau haut.



c) Montage "pont diviseur de tension"

Un "pont diviseur de tension" est un montage électrique simple qui peut être formé en série d'une source de tension, d'un capteur et d'un composant électrique qui peut être ou non de même type.

Le but du pont diviseur de tension est de fournir une tension plus faible à partir d'une tension plus grande.

Figure 8 : Différents conditionneurs de signal

Le choix d'un conditionneur est une étape importante dans la réalisation d'un ensemble de mesure. C'est, en effet, l'association capteur - conditionneur qui détermine le signal électrique. De la constitution du conditionneur, peut dépendre un certain nombre de performances de l'ensemble de mesure : sensibilité, linéarité, insensibilité à certaines grandeurs d'influence, ...

## 2. Chaîne d'acquisition

Pour obtenir une image d'une grandeur physique, on fait appel à une **chaîne d'acquisition** (chaîne de mesure). La chaîne d'acquisition est constituée de l'ensemble des dispositifs, y compris le capteur, rendant possible, dans les meilleures conditions, la détermination précise de la valeur du mesurande (*figure 9*).



Figure 9 : Synoptique simplifié d'une chaîne d'acquisition

La structure de base d'une chaîne d'acquisition comprend trois étages :

- Un **capteur** est le premier maillon de la chaîne : soumis à l'action du mesurande, il permet, directement s'il est actif ou par le moyen de son conditionneur de signal s'il est passif, de délivrer dans la chaîne un signal électrique, support de l'information liée au mesurande.
- Un **conditionneur de signaux** dont le rôle principal est de récupérer le signal électrique issu du capteur et de le convertir sous une forme qui rend possible l'exploitation directe de la valeur du mesurande par l'unité de visualisation ou d'utilisation.

On parle alors d'adaptation de la source du signal à la chaîne d'acquisition :

- ❖ amplification du signal,
- ❖ filtrage destiné à réduire les dégradations du signal par le bruit et les parasites,
- ❖ adaptation du signal à l'interface utilisateur (affichage numérique, ordinateur, ...),
- ❖ ...

- Une *unité de visualisation et/ou d'utilisation* qui permet de lire la valeur de la grandeur et/ou de l'exploiter :
  - appareil de mesure (voltmètre, ...),
  - enregistreur analogique ou numérique,
  - actionneur (servomoteur, ...)
  - ...

Cette structure de base se rencontre dans toutes les chaînes d'acquisition et ce, quelle que soit leur complexité et leur nature (*figure 10*).

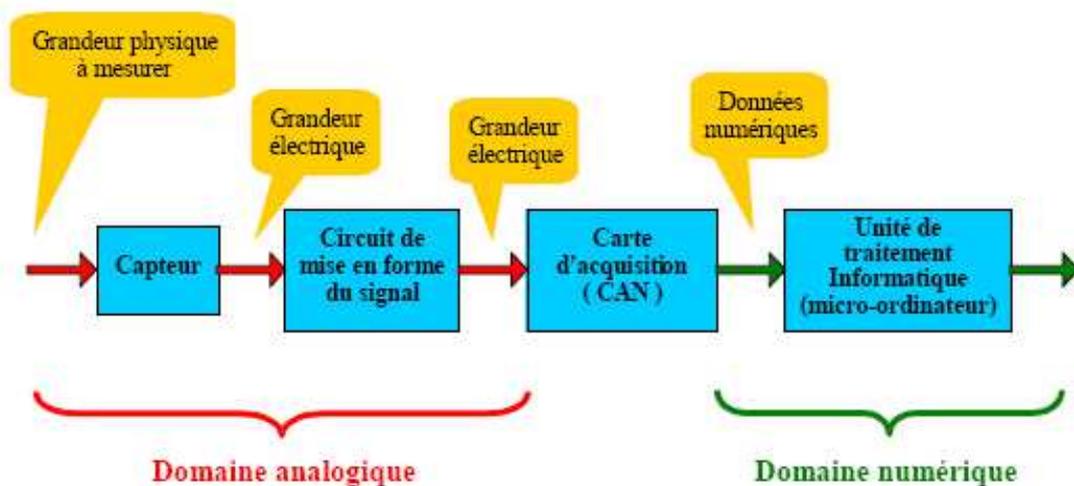


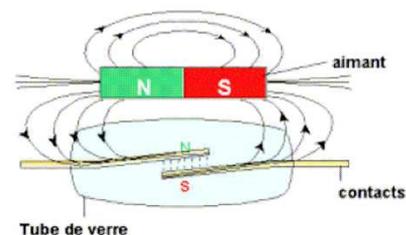
Figure 10 : Chaîne d'acquisition analogique - numérique

### Exercice n°1 : "Capteur ILS"

Un capteur magnétique ILS (Interrupteur à Lame Souple) permet de détecter sans contact tout objet magnétique qui se trouve à proximité de la tête de détection.



Le détecteur ILS se compose de 2 lames conductrices (tête de détection). L'approche ou le passage d'un objet magnétique ou d'un aimant entraîne la déformation de ces lames, celles-ci entrent en contact et permettent le passage d'un courant électrique.



Exemple d'application :



Au passage d'un aimant situé sur la pédale, le détecteur ILS permet d'acquérir l'information du mouvement d'une marche (step).

Dans le cadre de l'exemple d'application proposé (le mini-stepper), répondre aux questions suivantes :

1. Définir le mesurande (m) et la grandeur de sortie (s) du capteur ILS.
2. Ce capteur ILS est-il un capteur logique (TOR), analogique ou numérique ?
3. Ce capteur ILS est-il un capteur actif ou passif ?

**Exercice n°2 : "Conditionneur de signal : le montage potentiométrique"**

Le montage potentiométrique est un prolongement et une application du montage connu sous le nom de "pont diviseur de tension". Le montage du "pont diviseur de tension" est donné sur la *figure 11*. Ce montage très simple apparaît fréquemment dans divers montages électriques ou électroniques, notamment pour le conditionnement des signaux issus de capteurs. Il est utile de maîtriser ce montage et de connaître le théorème associé.

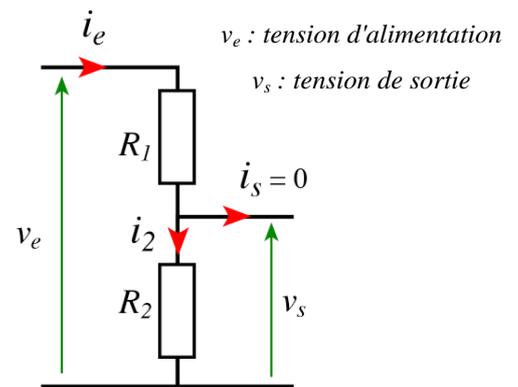
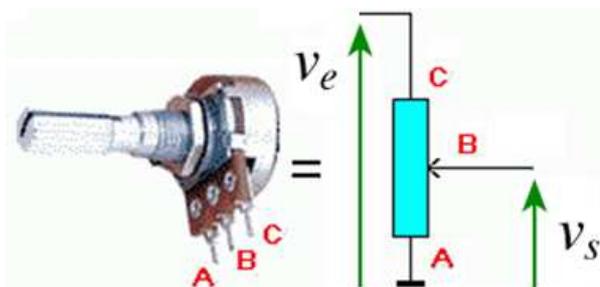


Figure 11 : Schéma du pont diviseur de tension

1. Exprimer la loi des nœuds entre les courants  $i_e$ ,  $i_2$  et  $i_s$ . En déduire la relation entre les courants  $i_2$  et  $i_e$ .
2. A l'aide de la loi d'Ohm, exprimer la tension  $v_s$  en fonction de  $R_2$  et  $i_2$ . En déduire la tension  $v_s$  en fonction de  $R_2$  et  $i_e$ .
3. A l'aide de la loi des mailles et de la loi d'Ohm, exprimer la tension  $v_e$  en fonction de  $R_1$ ,  $i_e$ ,  $R_2$  et  $i_2$ . En déduire la tension  $v_e$  en fonction de  $R_1$ ,  $R_2$  et  $i_e$ .
4. Conclure sur la relation liant la tension  $v_s$  avec  $R_1$ ,  $R_2$  et  $v_e$ .

5. Application : Le montage potentiométrique



Un potentiomètre est une résistance variable à trois bornes, dont une est reliée à un curseur se déplaçant sur une piste résistive terminée par les deux autres bornes. Il permet de recueillir, entre la borne reliée au curseur et une des deux autres bornes, une tension qui dépend de la position du curseur et de la tension à laquelle est soumise la résistance.

Un potentiomètre peut être rotatif ou rectiligne.



Potentiomètre rotatif



Potentiomètre rectiligne

A l'aide de la relation obtenue à la question 4., déterminer la tension  $v_s$  et compléter le tableau ci-dessous avec  $v_e = 3,3 \text{ V}$  et  $R_{AC} = 10 \text{ k}\Omega$ .

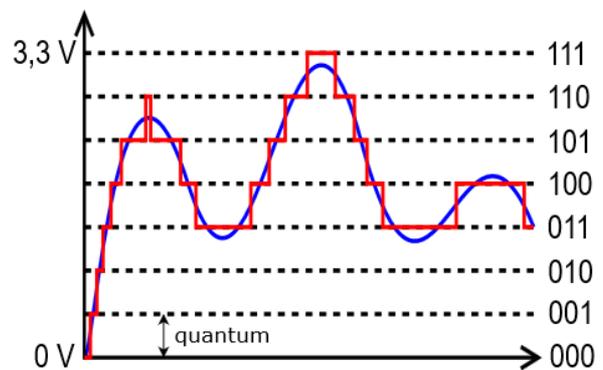
$R_{AB}$	100 $\Omega$	4,5 k $\Omega$	10 k $\Omega$
$v_s$			

**6. Application : La conversion analogique - numérique**

La tension de sortie  $v_s$  du pont diviseur de tension est maintenant connecter à une entrée analogique d'une carte BBC micro:bit.

Le microcontrôleur de la carte contient un Convertisseur Analogique - Numérique (CAN) (note 1) dont la résolution est de 10 bits. Il est alimenté avec une tension  $v_e = 3,3 \text{ V}$  et convertit donc proportionnellement un niveau de tension variant de 0 V à 3,3 V en une valeur numérique entière comprise entre 0 et 1023 ( $2^{10} = 1024$  valeurs). La plus petite variation de tension (quantum) que l'on peut mesurer est donc :

$$q = \frac{v_e}{2^n - 1} = \frac{3,3}{1023} = 3,2 \text{ mV}.$$



Exemple de conversion analogique numérique

Convertisseur Analogique - Numérique (CAN) :

Résolution : 3 bits

Valeur numérique entière comprise entre 0 et 7

( $2^3 = 8$  valeurs)

$$\text{Quantum} : q = \frac{v_e}{2^n - 1} = \frac{3,3}{7} = 0,47 \text{ V}$$

En déduire la valeur numérique entière et le mot binaire déterminé par le Convertisseur Analogique - Numérique (CAN) de la carte BBC et compléter le tableau ci-après avec  $v_e = 3,3 \text{ V}$  et  $R_{AC} = 10 \text{ k}\Omega$ .

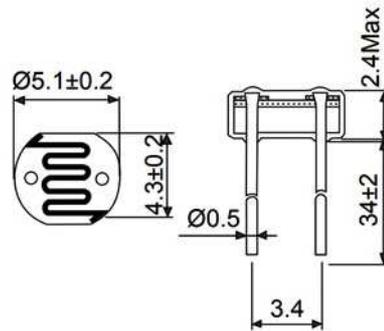
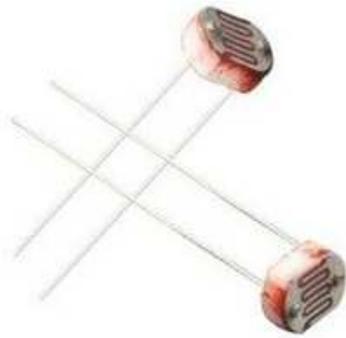
$R_{AB}$	100 $\Omega$	4,5 k $\Omega$	10 k $\Omega$
Valeur numérique			
Mot binaire			

Note 1 : Le Convertisseur Analogique - Numérique (CAN) :

Un Convertisseur Analogique - Numérique (CAN), ou en anglais *Analog to Digital Converter* (ADC), est un montage électronique dont la fonction est de traduire une grandeur analogique en une valeur numérique entière (codée sur plusieurs bits), proportionnelle au rapport entre la grandeur analogique d'entrée et la valeur maximale du signal. Le signal converti est le plus souvent une tension électrique.

## Exercice n°3 : "Capteur de luminosité"

### Photorésistance - 5 mm - LDR



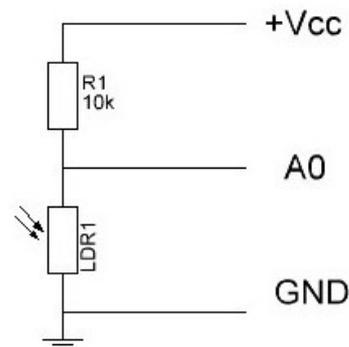
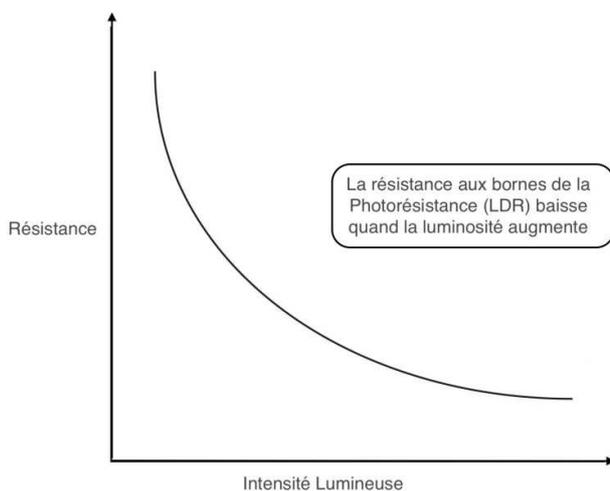
Photorésistance (LDR ou Light Dependent Resistor), avec encapsulation epoxy, de diamètre 5mm

### En savoir plus

Plus la lumière est intense et plus la résistance est basse. Ainsi, quand la photorésistance est plongée dans l'obscurité totale, on lit une résistance à ses bornes de plus de 2 M $\Omega$ , et quand elle est sous un ciel lumineux, la résistance descend sous les 200 Ohms.

Pour utiliser cette photorésistance LDR dans un projet électronique (Arduino ou Raspberry Pi par exemple), connecter une borne (n'importe laquelle, car il n'y a pas de polarité) au Ground (GND) et l'autre borne à une entrée analogique ainsi qu'à une résistance (10 K $\Omega$  par exemple) connectée de l'autre côté au + Vcc (+ 5 V ou + 3,3 V).

**Photorésistance (LDR)**  
**Courbe de Résistance vs Intensité Lumineuse**



Montage potentiométrique

Résistance dans le noir (0 Lux) : 2 MOhm ( $\pm 20\%$ )

Dissipation de puissance (25 °C) : 100 mW

Tension Max (25 °C) : 150 Volts DC (courant continu)

Température de fonctionnement : - 30 °C à + 70 °C

Temps de réaction : 30 ms

En exploitant la documentation technique ci-dessus, répondre aux questions suivantes :

1. Définir le mesurande (m) et la grandeur de sortie (s) du capteur de luminosité.
2. Ce capteur de luminosité est-il un capteur actif ou passif ?
3. Associé à son conditionneur de signal (montage potentiométrique, pont diviseur de tension), ce capteur de luminosité est-il un capteur logique (TOR), analogique ou numérique ?

#### **Exercice n°4 : "Capteur de distance à ultrasons"**

"Le capteur HC-SR04 utilise les ultrasons pour déterminer la distance d'un objet. Il offre une excellente plage de détection sans contact, avec des mesures de haute précision et stables." *Extrait de la documentation technique du capteur*

En exploitant la documentation technique du capteur HC-SR04 mise à disposition, répondre aux questions suivantes :

1. Définir le mesurande (m) et la grandeur de sortie (s) du capteur de distance à ultrasons.
2. Ce capteur de distance à ultrasons est-il un capteur logique (TOR), analogique ou numérique ?
3. Donner l'étendue de mesure (E.M.), la résolution ( $R_s$ ) et la sensibilité du capteur (S).
4. Tracer la courbe d'étalonnage du capteur sur l'intervalle utile.
5. Ce capteur de distance à ultrasons est-il un capteur actif ou passif ?

#### **Exercice n°5 : "Capteur de pression"**

Un capteur de pression et son conditionneur de signal donnent en sortie une tension  $v$  en fonction de la pression  $p$  suivant la fonction polynomiale suivante :  $v(p) = 33.10^{-3}.p - 3.10^{-6}.p^2 + 1.10^{-9}.p^3$

Dans cette expression la pression est en hectopascal (hPa) et la tension  $v$  en millivolt (mV). Pour fixer les idées sur les unités de pression choisies, on rappelle que la pression atmosphérique ordinaire est d'environ  $10^5$  Pa (1 bar). La pression du milieu où on effectue les mesures par l'intermédiaire de ce capteur est susceptible de varier entre 100 hPa et 2000 hPa.

1. Définir le mesurande (m) et la grandeur de sortie (s) du capteur de pression.
2. Ce capteur de pression est-il un capteur logique (TOR), analogique ou numérique ?
3. Donner l'étendue de mesure (E.M.) du capteur.
4. Tracer la courbe d'étalonnage du capteur sur l'intervalle utile.
5. En déduire la pression  $p$  du milieu lorsque la tension de sortie est égale à 40 mV.

#### **Exercice n°6 : "Capteur de température"**

Un capteur linéaire mesure une température  $T$  en °C, la grandeur de sortie est un courant  $i$  compris entre 4 mA et 20 mA. L'étendue de mesure (E.M.) est respectivement : [- 50 ; + 200].

Le lien entre les grandeurs  $i$  et  $T$  est :  $i(T) = a.T + b$

1. Définir le mesurande (m) et la grandeur de sortie (s) du capteur de température.
2. Ce capteur de température est-il un capteur logique (TOR), analogique ou numérique ?
3. Déterminer les valeurs numériques de  $a$  et  $b$ . Donner l'unité de ces constantes.
4. Tracer la courbe d'étalonnage du capteur sur l'intervalle utile.

5. En déduire, par graphique puis par calcul, la température  $T$  lorsque le courant de sortie est égal à 12 mA.
6. Donner la sensibilité  $S$  du capteur de température.

### **Exercice n°7 :**

1. Parmi les capteurs étudiés au travers les exercices 1, 2, 3, 4, 5 et 6, lequel ou lesquels ne sont pas utilisés dans les Parcours "Programmez vos objets connectés" de France-IOI ?
2. A partir de la liste fournie, liste présentant des capteurs pouvant être connecté sur un Raspberry Pi avec un Grove Base Hat, repérer tous les capteurs utilisés dans les parcours "Programmez vos objets connectés" de France-IOI et non étudiés au travers les exercices 1, 2, 3, 4, 5 et 6.

Pour chacun d'entre eux, répondre aux questions suivantes :

- 2.1. Définir le mesurande (m) et la grandeur de sortie (s) du capteur.
  - 2.2. Le capteur est-il un capteur logique (TOR), analogique ou numérique ?
  - 2.3. Le capteur est-il un capteur actif ou passif ?
  - 2.4. Indiquer d'autres caractéristiques significatives spécifiques au capteur.
3. Lister les capteurs que vous auriez à mettre en œuvre dans le cadre de vos projets.