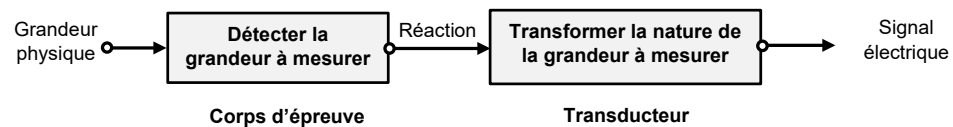


Chapitre 15 : Capteurs et détecteurs

I. Introduction

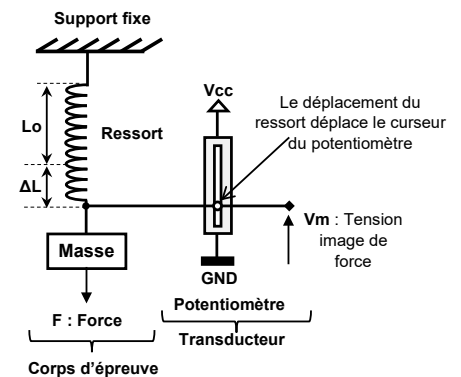
Dans les systèmes industriels et automatisés, les capteurs et détecteurs assurent la fonction « Acquérir » de la chaîne d'information. Ils mesurent ou détectent une grandeur physique, appelée mesurande, telle que la température, la pression, la position, la vitesse ou la présence d'un objet.

Le capteur, associé à un **transducteur**, convertit cette grandeur en un signal électrique exploitable. Ce signal est ensuite conditionné, transmis et traité par la partie commande. La **qualité** de la mesure peut toutefois être affectée par des grandeurs d'influence issues de l'environnement, comme la température, l'humidité ou les perturbations électromagnétiques.



✂ **Corps d'épreuve** : élément sensible soumis au mesurande. Il réagit à la grandeur physique à mesurer et la transforme en une grandeur intermédiaire, généralement mécanique, comme une déformation, un déplacement ou une force.

✂ **Transducteur** : élément qui convertit la grandeur intermédiaire fournie par le corps d'épreuve en un signal exploitable, le plus souvent de nature électrique.



Exemple : Mesure de force à l'aide d'un ressort

II. Caractéristique des capteurs

Les capteurs peuvent être caractérisés selon la grandeur physique mesurée, comme la position, la température, la vitesse, la force ou la pression, ainsi que selon la nature du signal délivré : logique, analogique ou numérique. Cette classification facilite l'analyse des signaux d'entrée et de sortie de la chaîne d'acquisition complète.

1. Grandeur physique à mesurer (mesurande)

Un capteur est choisi selon la nature de la grandeur physique à mesurer. Celle-ci peut être **cinématique**, comme la position, la vitesse, l'accélération ou l'angle ; **mécanique**, comme la force, le couple ou la pression ; liée aux **fluides**, comme le débit, le niveau ou la pression ; **thermique**, comme la température ; ou encore **électrique**, comme la tension, le courant et la puissance.

2. Grandeur physique sortant du corps d'épreuve

Le corps d'épreuve réagit à la grandeur mesurée et la transforme en une autre grandeur physique facilement exploitable par le transducteur. Cette transformation peut se traduire par une **variation de résistance**, de **capacité**, d'**inductance**, de **longueur**, de **déplacement**, de **fréquence** ou par l'apparition d'une **tension électrique**.

3. Grandeur physique du signal de sortie

Le signal fourni par le capteur peut être **analogique**, lorsqu'il varie de manière continue et proportionnelle à la grandeur mesurée ; **logique** ou **tout ou rien**, lorsqu'il prend uniquement deux états, généralement 0 ou 1 ; ou **numérique**, lorsqu'il est codé sous la forme d'un mot binaire de plusieurs bits.

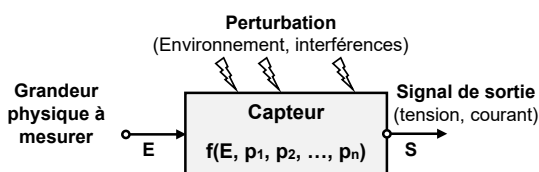
Capteur logique	Capteur analogique	Capteur numérique
Exemple : Capteur de proximité Souvent appelés détecteurs, identifient la présence ou la proximité d'un objet.	Exemple : Capteur de température PT100 Ils fournissent un signal analogique sous la forme d'une tension ou d'un courant variant de manière continue.	Exemple : Codeur absolu (Position) Ils délivrent soit un train d'impulsions proportionnel à la grandeur mesurée, soit un mot binaire dans le cas d'un codeur absolu.

III. Caractéristiques métrologiques d'un capteur

Les caractéristiques métrologiques d'un capteur permettent d'évaluer la qualité et la fiabilité des mesures qu'il fournit. Le choix d'un système d'acquisition dépend du cahier des charges, de la grandeur physique à mesurer, de son étendue de variation et des conditions d'utilisation. Les performances indiquées par le constructeur sont déterminées lors d'essais et d'étalonnages réalisés dans des conditions de référence.

1. Courbe d'étalonnage du capteur

La courbe d'étalonnage relie la grandeur physique mesurée au signal de sortie du capteur. Elle permet d'évaluer sa sensibilité et de convertir le signal en valeur physique de type électrique.



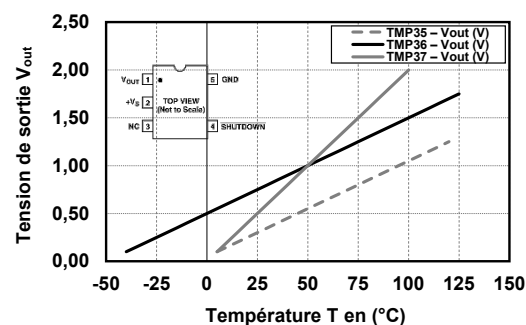
La fonction f représente la courbe d'étalonnage idéale du capteur, sans perturbations. En pratique, le modèle de mesure est influencé par différentes grandeurs perturbatrices et devient plus complexe :

$$S = f(E, p_1, p_2, \dots, p_n)$$

Pour le capteur température TMP36, l'équation sans perturbation

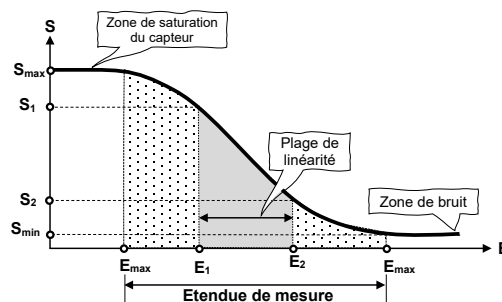
$$S = f(E) : V_{out} = a \cdot T + b \Rightarrow a = \frac{1.05}{50-0} = 0.01V/^{\circ}C \text{ et } b = 0.5^{\circ}C$$

d'où : $V_{out} = 0.01T + 0.5$



2. Etendue de mesure et plage de linéarité du capteur

L'étendue de mesure correspond à l'intervalle des valeurs du mesurande pour lequel le capteur respecte les performances annoncées par le fabricant. Elle est déterminée sur la courbe d'étalonnage entre les **valeurs minimale et maximale mesurables**, tout en maintenant les erreurs inférieures à un seuil fixé : $EM = E_{max} - E_{min}$

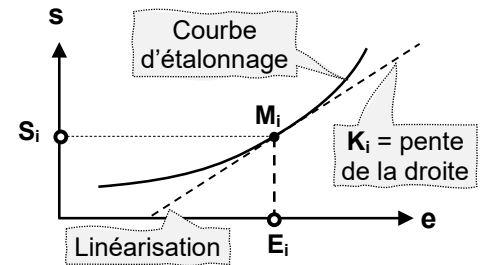


⚠ Remarque importante : Il ne faut pas confondre l'étendue de mesure EM définie par le fabricant avec la plage de mesure ΔE réellement utilisée dans une application, généralement plus limitée.

Etendue de mesure de capteur de température TMP36 : $T_{max} = 125^{\circ}C$ et $T_{min} = -40^{\circ}C \Rightarrow E_{max} = 16.5^{\circ}C$

3. Sensibilité et linéarité du capteur

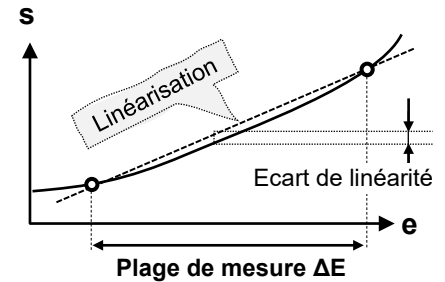
La sensibilité K_i d'un capteur est la mesure de sa capacité à détecter de petites variations de la grandeur physique qu'il mesure, exprimée généralement en sortie électrique par unité de variation de la grandeur d'entrée physique : $K_i = \left(\frac{ds}{de} \right)_{E_i}$



La sensibilité du capteur TMP36 (page 2) : $Donc : K_i = \frac{\Delta V_{out}}{\Delta T} \Rightarrow K_i = \frac{1-0.5}{50-0} \Rightarrow K_i = 10 \text{ mV}/^\circ\text{C}$

☒ **Courbe non linéaire** : la sensibilité du capteur n'est pas constante. Elle dépend de la valeur du mesurande et correspond à la pente de la tangente à la courbe d'étalonnage au point considéré (l'on se place).

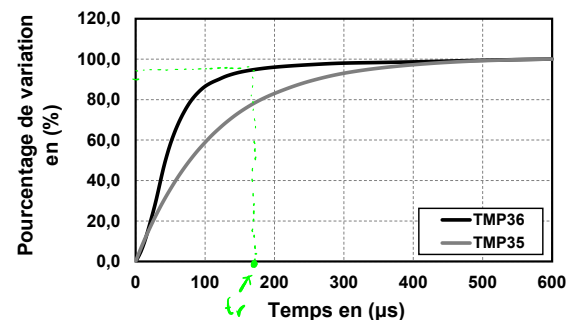
☒ **Courbe quasi linéaire** : la sensibilité peut être considérée comme constante et correspond à la pente moyenne de la droite d'étalonnage (trouvée par la méthode des moindres carrés). L'écart de linéarité représente la plus grande différence entre la courbe réelle du capteur et cette droite idéale. Plus cet écart est faible, plus le capteur est linéaire et précis.



Remarque : La notion de sensibilité n'est vraiment de sens que pour le fonctionnement linéaire du capteur.

4. Rapidité et temps de réponse du capteur

Lors d'une variation brusque du mesurande, le capteur traverse d'abord un régime transitoire avant d'atteindre le régime permanent. Sa rapidité est caractérisée par le temps de réponse à $n\%$, généralement 5% , correspondant au temps nécessaire pour que la sortie reste proche de sa valeur finale avec la précision souhaitée définie.



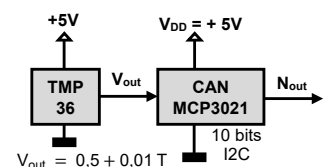
Le temps de réponse à 5% ($t_{r5\%}$) du capteur TMP35 : $t_{r5\%} = 180 \mu s$

5. Résolution du capteur

La résolution d'un capteur correspond à la plus petite variation du mesurande qu'il peut détecter. Elle s'exprime souvent en pourcentage (%) de l'étendue de mesure EM ou de la pleine échelle PE (en anglais %FSO).

Exemple : Résolution de la chaîne de mesure (TMP36 – CAN MCP3021)

Le cas le plus courant concerne les capteurs analogiques associés à une chaîne d'acquisition comprenant l'amplification, le filtrage et la conversion analogique-numérique.



La sensibilité de capteur	La résolution convertisseur	Résolution (TMP + MCP3021)
$K = 10 \text{ mV}/^\circ\text{C}$	$q = \frac{V_{DD}}{2^n}$	$\Delta T = \frac{q}{S}$
	$q = 4.88 \text{ mV}$	$\Delta T = 0.488 ^\circ\text{C}$

La résolution théorique de la chaîne de mesure TMP36–MCP3021 : $R(\%) = \frac{\Delta T}{EM} \times 100 \Rightarrow R(\%) = 0.29\%$

⚠ Remarque : Un capteur analogique délivre un signal continu ; sa résolution propre est donc difficile à déterminer directement. En pratique, la plus petite variation détectable est principalement limitée par le bruit du capteur et par les performances de toute la chaîne de conditionnement et d'acquisition.

6. Précision du capteur

La précision caractérise l'aptitude d'un capteur à fournir une mesure proche de la valeur vraie ou de référence. Elle dépend simultanément de la justesse et de la fidélité du capteur.

🎯 Justesse : La justesse caractérise la proximité entre la **valeur moyenne des mesures $\bar{m}$** fournies par le capteur et la **valeur vraie ou de référence m_{ref}** . Un capteur est juste lorsque son erreur systématique est faible : $e_{\text{justesse}} = \bar{m} - m_{\text{ref}}$

🌀 Fidélité : La fidélité caractérise la capacité du capteur à fournir des résultats proches les uns des autres lors de mesures répétées dans les mêmes conditions. Elle est liée à la dispersion des mesures, généralement évaluée par l'écart-type σ :

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^n (m_k - \bar{m})^2}{n-1}}$$

Pour une distribution normale, la majorité des mesures se trouve approximativement dans l'intervalle :

$$\bar{m} - 3\sigma \leq m \leq \bar{m} + 3\sigma$$

⚠ Origine des erreurs :

- **Erreurs systématiques :** elles produisent un décalage constant des mesures. Elles peuvent provenir d'un mauvais étalonnage, d'un offset ou d'une erreur de sensibilité. Elles peuvent généralement être corrigées.
- **Erreurs aléatoires :** elles varient d'une mesure à l'autre à cause du bruit, des perturbations électromagnétiques ou des variations de l'alimentation. Elles peuvent être réduites par filtrage ou par moyennage.

Exemple : étude de précision du TMP36

On place le TMP36 dans un milieu dont la température de référence est : $T_{\text{ref}} = 25,0^\circ\text{C}$

Échantillons	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Température	25,0	25,1	25,2	25,3	25,4	25,1	25,2	25,3	25,2

📝 La valeur moyenne : $\bar{T} = \frac{\sum_{k=1}^9 T_k}{9} \Rightarrow \bar{T} = \frac{226,8}{9} \Rightarrow \bar{T} = 25,2^\circ\text{C}$

📝 Erreur de justesse : $e_j = \bar{T} - T_{\text{ref}} \Rightarrow e_j = 0,2^\circ\text{C}$

📝 Écart-type : $\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^9 (T_k - \bar{T})^2}{9-1}} \Rightarrow \sigma \approx 0,12^\circ\text{C} \Rightarrow$ La faible valeur de l'écart-type indique que les mesures sont peu

dispersées : le capteur est donc **fidèle**.

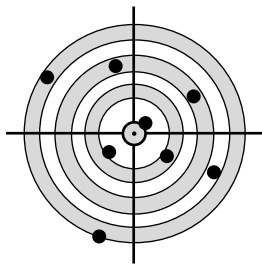
📝 Intervalle à 3σ : $\bar{T} - 3\sigma \leq T \leq \bar{T} + 3\sigma \Rightarrow 24,04^\circ\text{C} \leq T \leq 25,56^\circ\text{C} \Rightarrow \delta T = \pm 0,36^\circ\text{C}$

Le TMP36 est fidèle dans cet essai, car les mesures sont peu dispersées. Il présente toutefois une erreur de justesse de $+0,2^\circ\text{C}$. Après correction de cette erreur, le résultat peut être exprimé par : $T = 25,0 \pm 0,36^\circ\text{C}$. La valeur $0,36^\circ\text{C}$, est une incertitude de mesure (ou élargie), notée δM .

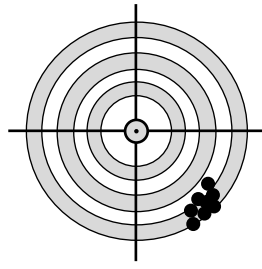
La précision peut être exprimée en pourcentage de l'étendue de mesure : $P(\%) = \frac{\delta M}{EM} \times 100 \Rightarrow P = 0,21\%$

💡 Remarque importante : la précision ne peut pas être évaluée correctement à partir d'une seule mesure. Elle nécessite un étalonnage avec une valeur de référence et plusieurs mesures répétées.

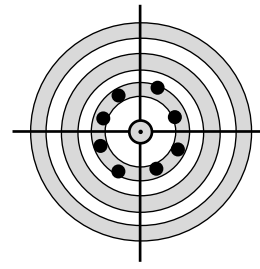
Ces notions peuvent également être illustrées par l'image d'une cible : chaque mesure est assimilée à un tir réalisé dans les mêmes conditions, avec le même capteur et le même opérateur. La répartition des impacts permet alors d'évaluer la justesse et la fidélité du capteur. Nous avons fait **8 tirs par chaque cible** , les résultats sont les suivants :



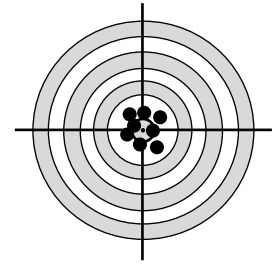
Ni juste, ni fidèle
non précis



Non juste, fidèle
non précis



Juste, non fidèle
non précis



Juste, fidèle = Précis

IV. Détecteur de position

La détection est essentielle dans les automatismes pour identifier la présence, l'absence, la position, le passage ou le nombre d'objets. Contrairement aux capteurs, dont la sortie varie avec la grandeur mesurée, les détecteurs fournissent généralement une information binaire indiquant uniquement deux états possibles : **présence** ou **absence**.

1. Détecteur mécanique à contact

Les détecteurs mécaniques à contacts, appelés aussi interrupteurs de position, détectent un objet par contact direct.

Ils sont constitués de :

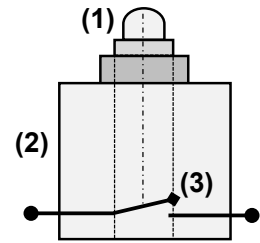
-  (1) Une tête de commande ;
-  (2) Un corps de protection ;
-  (3) Un contact électrique.



Tête à mouvement
rectiligne



Tête à mouvement
multidirectionnel



Tête à mouvement
angulaire

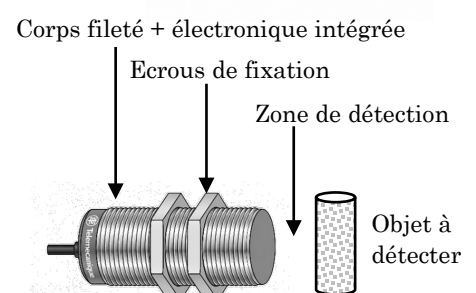
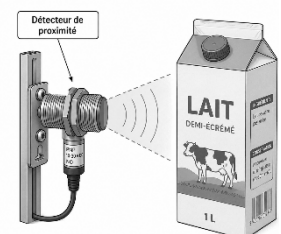
Lorsque l'objet agit sur la tête de commande, le mécanisme provoque l'ouverture ou la fermeture du contact électrique.

2. Détecteurs de proximité

Très répandus, ces détecteurs identifient sans contact la présence d'un objet à courte distance, de quelques **millimètres à quelques centimètres**. Au-delà, les détecteurs photoélectriques sont généralement utilisés.

Il existe deux principaux types de détecteurs de proximité, dont le fonctionnement repose sur la modification d'une grandeur physique par la présence d'un objet :

-  Le champ électromagnétique à haute fréquence pour les détecteurs inductifs ;
-  La capacité électrique d'un circuit oscillant pour les détecteurs capacitifs.



2.1. Détecteurs de proximité inductifs

Un détecteur inductif est constitué d'un **oscillateur**, d'un **étage de mise en forme** et d'un **étage de sortie**. L'oscillateur génère un **champ électromagnétique** à haute fréquence (100 à 600 kHz). Lorsqu'un objet métallique s'approche, des **courants induits** apparaissent et **réduisent** l'amplitude des oscillations. Cette diminution est détectée par le circuit électronique, qui commande alors la commutation de la sortie du détecteur.



2.2. Détecteurs de proximité capacitifs

Un détecteur capacitif comprend un oscillateur associé à une sonde capacitive, un étage de mise en forme et un étage de sortie. Lorsqu'un objet s'approche, la capacité du circuit augmente. Dès qu'elle atteint un seuil déterminé, l'oscillateur s'active et commande la sortie. La détection dépend de la taille, de la nature du matériau et de sa distance par rapport à la sonde.

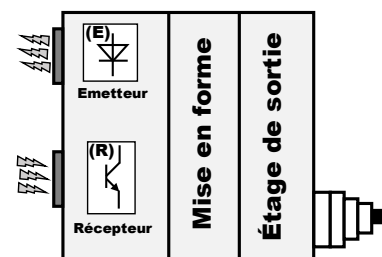


3. Détecteurs photoélectriques

Les détecteurs photoélectriques assurent la détection d'objets sans contact grâce à un faisceau lumineux. Ils conviennent à de nombreux matériaux, qu'ils soient opaques, réfléchissants ou transparents. Leur fonctionnement repose sur la modification de la lumière reçue lorsqu'un objet bloque, réfléchit ou renvoie le faisceau vers le récepteur. Ils sont principalement constitués des éléments suivants :

- Un **émetteur** lumineux (E) à **DEL** (diode électroluminescente) ;
- Un **récepteur** de lumière (R) utilisant un phototransistor ou une photodiode ;
- Un étage de **mise en forme** du signal ;
- Un **étage de sortie**.

Afin de limiter l'influence de la lumière ambiante, la DEL émet une lumière pulsée. Selon l'application, cette lumière peut être **infrarouge** pour la détection courante, **ultraviolette** pour repérer les matériaux luminescents, **rouge** ou **verte** pour lire des repères colorés, ou produite par un **laser rouge** pour obtenir une grande portée et une détection plus précise.



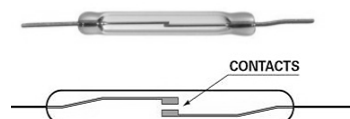
➤ Différents systèmes et critères différenciateurs

Système barrage	Système reflex polarisé	Système proximité	Système proximité à arrière-plan supprimée
L'émetteur et le récepteur sont séparés. Il offre une grande portée, jusqu'à 50 m ou 100 m avec laser, et résiste aux environnements difficiles, mais détecte mal les objets transparents.	L'émetteur et le récepteur sont intégrés au même boîtier. Sa portée reste inférieure à 15 m et il convient surtout aux milieux propres, hors objets transparents ou réfléchissants.	L'émetteur et le récepteur sont regroupés dans un même boîtier. Sa portée, inférieure à 2 m, dépend de la couleur et du pouvoir réfléchissant de l'objet.	Dans le système de proximité avec effacement de l'arrière-plan, le réglage de portée limite les réflexions parasites et assure une détection stable, quelle que soit la couleur de l'objet.

4. Autre détecteur de position

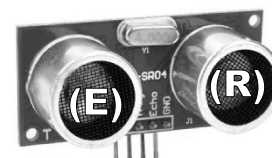
➤ Détecteurs ILS

Un détecteur ILS utilise des **lames métalliques** sensibles au **champ magnétique**. L'approche d'un aimant **ferme le contact**. Il sert notamment à repérer la position des pistons dans les vérins pneumatiques



➤ Détecteurs à ultrasons

Un détecteur à ultrasons émet une onde puis reçoit son écho. Le temps entre émission et réception permet de détecter un objet ou d'en mesurer la distance avec précision.



V. Capteurs électriques

1. Modes de fonctionnement.

Les capteurs fonctionnent principalement selon deux principes :

- **Les capteurs actifs** convertissent directement l'énergie fournie par le mesurande en une grandeur électrique, telle qu'une tension, un courant ou une charge électrique.

Exemples : génératrice tachymétrique, capteur piézoélectrique.

- **Les capteurs passifs** se comportent comme une impédance dont l'un des paramètres électriques, résistance, inductance ou capacité, varie sous l'effet du mesurande. Ils nécessitent une alimentation ou un circuit de conditionnement pour produire un signal électrique exploitable.

Exemples : sonde de température PT100, photorésistance LDR.

2. Capteur à résistance variable

Les capteurs à résistance variable sont des capteurs passifs dont la résistance électrique évolue sous l'action de la grandeur physique à mesurer. Cette variation peut être décrite par la relation de la résistance d'un conducteur :

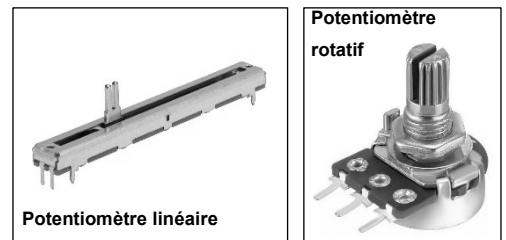
$$R = \rho \frac{\ell}{S} = \rho_0 (1 + \alpha \theta) \frac{\ell}{S}$$

- R : résistance électrique du conducteur (Ω);
- ρ : résistivité du matériau à la température θ ($\Omega \cdot m$);
- ρ_0 : résistivité à la température de référence ;
- α : coefficient de température ($^{\circ}C^{-1}$);
- θ : variation de température ($^{\circ}C$);
- ℓ : longueur du conducteur (m);
- S : section du conducteur (m^2).

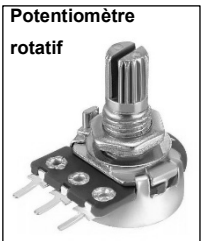
Note : Lorsque le coefficient de température α est constant, la résistance R peut varier sous l'effet d'une modification de la longueur ℓ du conducteur ou de sa température θ .

2.1. Capteur de position : potentiomètre

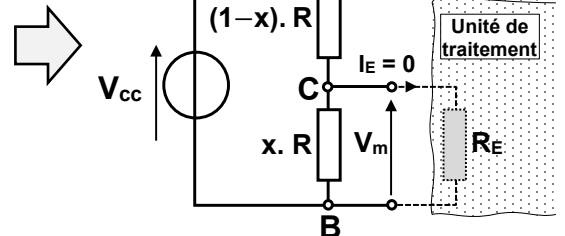
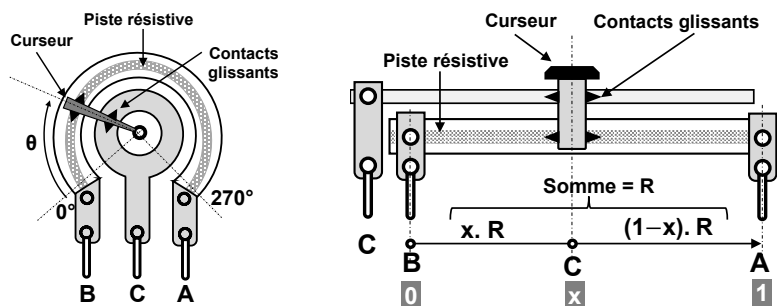
Le potentiomètre permet de mesurer une position ou un déplacement grâce à un curseur solidaire de l'objet. Simple à utiliser, il délivre une tension suffisamment élevée sans amplification. Son principal défaut reste l'usure mécanique de la piste résistive. Il existe également des modèles rotatifs, de 270° à plusieurs tours.



Potentiomètre linéaire



Potentiomètre rotatif



Modèle électrique d'un potentiomètre

Capteur potentiomètre industriel :



Poth, Linéaire Burster 8719-5900

- Course : 900 mm
- Résistance : 10 k Ω , ± 20 %
- Résolution : 0,01 mm
- Durée de vie : 50.10⁶ déplacements
- Vitesse maximale : 10 m/s



Poth, Rotatif : MEGATRON MCP40

- Course : $340^{\circ} \pm 5^{\circ}$
- Résistance : 200 K Ω
- Précision / linéarité : $\pm 0,1$ %
- Durée de vie : 50.10⁶ Rotations

La résistance d'entrée de l'unité de traitement est très grande, la tension V_m image de déplacement x est :

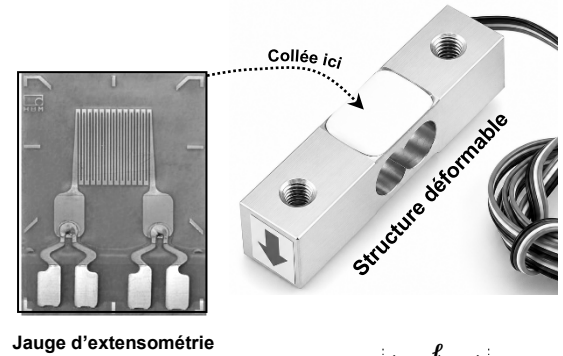
$$V_m = V_{cc} \frac{xR}{xR + (1-x)R} = \frac{xR}{R} \cdot V_{cc}$$

$$\text{d'où } V_m = x V_{cc}$$

2.2. Capteur à jauge d'extensométrie

Principe de fonctionnement

Une **jauge d'extensométrie** est une résistance électrique dont la valeur varie lorsqu'elle subit une **déformation mécanique** : traction, compression, flexion, torsion ou pression. La jauge est collée sur une **structure déformable** qui suit fidèlement ses déformations. Elle est constituée d'un conducteur métallique très fin, disposé en forme de grille sur un support isolant en résine époxy.

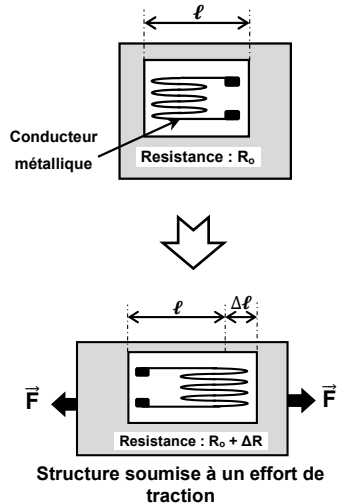


Lorsqu'elle s'allonge, sa résistance augmente. La variation relative de résistance est donnée par : $\frac{\Delta R}{R_0} = K \frac{\Delta \ell}{\ell}$; et on note $\epsilon = \frac{\Delta \ell}{\ell}$, l'**allongement** relatif, appelé aussi **déformation**,

Il est généralement **très faible**, d'environ : $10^{-7} \leq \epsilon \leq 10^{-1}$

Le facteur de jauge **K** vaut **0,5 à 4** pour les **jauges métalliques**, environ **K = 2** pour le Constantan et plus de **K = 100** pour les semi-conducteurs, mais ceux-ci sont très sensibles à la température.

Note importante : Il est préférable d'utiliser des conducteurs à **faible coefficient** de température afin de **réduire** l'influence de la **température** sur la **mesure**, comme le Constantan (Cu-Ni) ($\alpha \approx \pm 20 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$) Ou le Nichrome (Ni-Cr) ($\alpha \approx 100 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$).

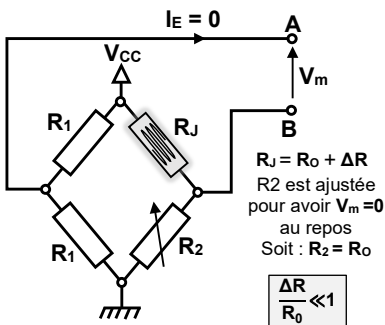


Différents types de jauges

Il existe différentes formes de jauges selon l'effort à mesurer, avec une ou plusieurs jauges placées sur un même support.

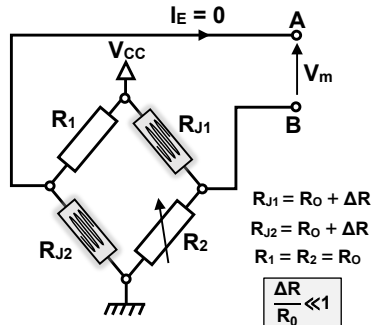
Jauge simple	Jauge double	Jauge en pont	Jauges de torsion et de cisaillement

Conditionnement de signal : Pont de Wheatstone



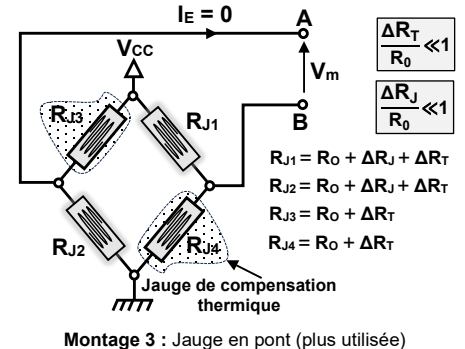
Le montage utilise une seule jauge dans un pont de Wheatstone équilibré au repos. Sa tension de sortie est **quasi linéaire** et proportionnelle à la déformation. Il reste toutefois peu **sensible**, car une seule branche est active, et fortement influencé par les **dérives de température** ΔR_T .

• la tension V_m : $V_m \approx \frac{\Delta R}{4 R_0} \cdot V_{CC}$
 • sensibilité $S = \frac{V_m}{\Delta R/R_0} = \frac{V_{CC}}{4}$



Le montage à **jauge double** utilise deux jauges actives dans le pont de Wheatstone. Il offre une sensibilité environ **deux fois supérieure** au montage à jauge simple et reste quasi linéaire pour $\Delta R/R_0 \ll 1$. Toutefois, il demeure sensible aux variations de température sans compensation adaptée.

• La tension de sortie V_m : $V_m \approx \frac{\Delta R}{2 R_0} V_{CC}$
 • La sensibilité : $S = \frac{V_m}{\Delta R/R_0} = \frac{V_{CC}}{2}$



Le montage utilise **deux jauges actives J1 et J2** et deux **jauges de compensation thermique J3 et J4**. Il conserve la sensibilité du montage à jauge double tout en annulant l'influence de la température. La sortie reste quasi linéaire :

$$V_m \approx \frac{\Delta R_T}{2 R_0} V_{CC}$$

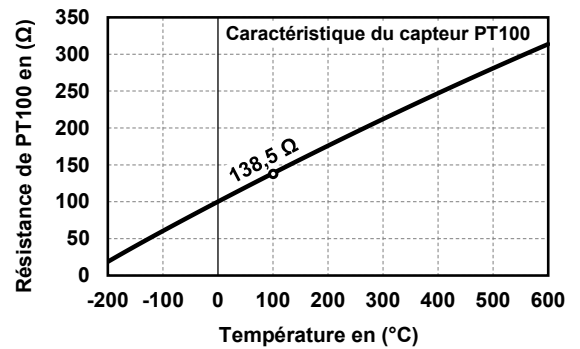
Sa sensibilité est : $S = \frac{V_m}{\Delta R/R_0} = \frac{V_{CC}}{2}$

ΔR_T : la variation de résistance due uniquement à la contrainte.

2.3. Capteurs de température à résistance variable

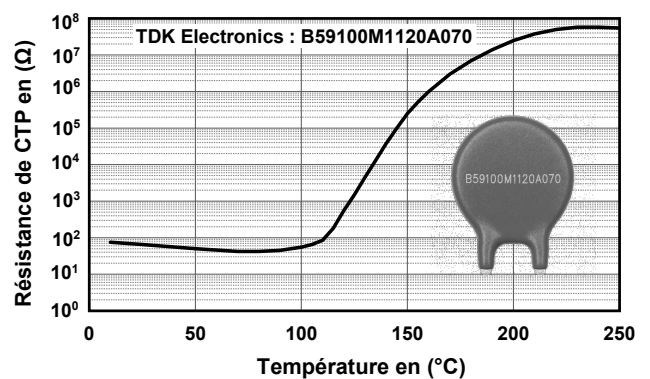
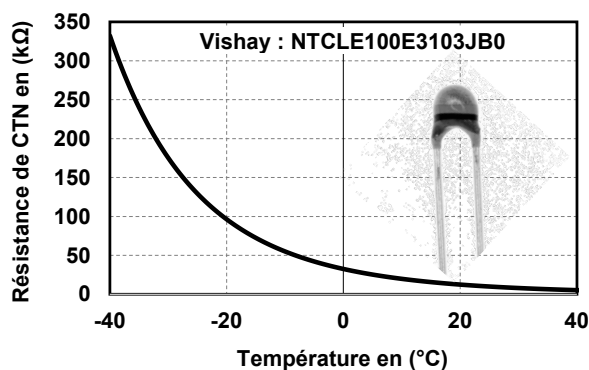
Capteur PT100

Le capteur PT100 est un capteur passif de température : elle nécessite une alimentation externe pour mesurer la variation de sa résistance. Constituée de platine, elle vaut **100 Ω** à **0 °C** et environ **138,5 Ω** à **100 °C**. Sa caractéristique est légèrement non linéaire, mais peut être considérée linéaire sur une plage limitée.



Thermistances CTP et CTN

Les thermistances CTP et CTN sont des **capteurs passifs** de température réalisés en **matériaux semi-conducteurs**. La résistance d'une CTP augmente fortement avec la température et présente souvent un seuil très **non linéaire**. Celle d'une **CTN diminue** lorsque la température **augmente**. Sa caractéristique est exponentielle et dépend de la résistance nominale **R₀** ainsi que de la constante **β** du matériau utilisé.



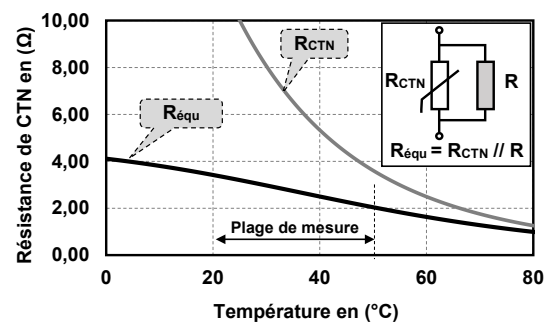
La relation caractéristique d'une thermistance CTN est :

$$R(T) = R_0 e^{\beta \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right)}$$

- **R(T)** : résistance à la température **T**;
- **R₀** : résistance nominale à **T₀**;
- **T** et **T₀** exprimées en **kelvins** (**T(°K) = T(°C) + 273,15**) ;
- **T₀ = 298,15 K = 25°C**;
- **β** : constante du matériau, généralement comprise entre **3000** et **5000 K**.

La CTN étant fortement non linéaire, une linéarisation est nécessaire. Une méthode simple consiste à **placer une résistance fixe en parallèle** avec la CTN afin d'obtenir une caractéristique **approximativement linéaire** sur une plage de température limitée.

Pour **R = 4.7 k Ω** $\Rightarrow$ **plage de mesure (20°C à 50°C)**.

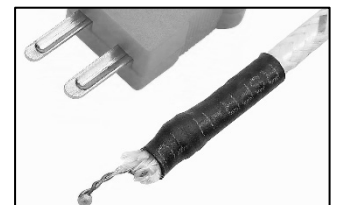
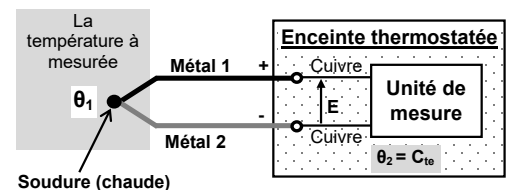


3. Thermocouples

Un thermocouple est un capteur actif de température constitué de deux métaux différents, **1** et **2**, reliés par deux jonctions. Lorsque la soudure chaude, à la température **θ_1** , et la soudure froide de référence, à la température **θ_2** , sont soumises à des températures différentes, une force électromotrice **E** apparaît par effet Seebeck : **E = S_{AB}($\theta_1 - \theta_2$)**

S_{AB} : le coefficient de Seebeck (V/°C) et **E** est la f.é.m de l'ordre de quelques dizaines de **mV**

La tension dépend de la nature des métaux et de l'écart de température entre les deux jonctions.

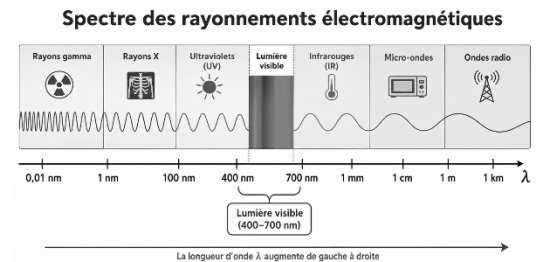


Les principaux types de thermocouples utilisés industriellement ont reçu un nom de code sous forme d'une lettre (E, J, K, T, S ...) et sont normalisés.

Type	Conducteur positif (+)	Conducteur négatif (-)	Plage de température (°C)	f.é.m. (E) (mV)
T	Cuivre	Constantan (1)	-270 à 400	-6 à 21
S	Platine – 10 % Rhodium	Platine	-50 à 1770	0 à 19
K	Chromel (2)	Alumel (3)	-270 à 1370	-6 à 55
J	Fer	Constantan	-270 à 1200	-8 à 69
E	Chromel	Constantan	-270 à 1000	-9 à 76
Principaux alliages : (1) Cuivre - Nickel ; (2) Nickel - Chrome ; (3) Nickel - Aluminium				

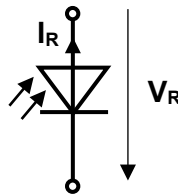
4. Capteurs photoélectriques

Les rayonnements électromagnétiques se distinguent par leur longueur d'onde. La lumière visible ne représente qu'une faible partie du spectre, entre **400** et **700 nm**. L'intensité lumineuse s'exprime en **candela**, le **flux** en **lumen** et l'**éclairement** en **lux**, avec la relation $E = \Phi/S$. Les niveaux varient selon les conditions d'éclairage.



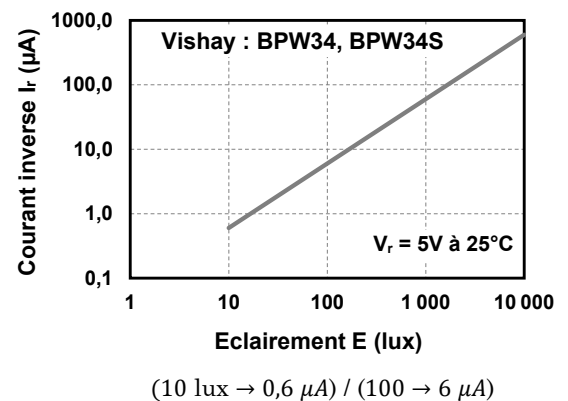
4.1. Photodiode

La photodiode au **silicium** peut fonctionner en **polarisation inverse** sous une tension V_R , inférieure à la tension de claquage. Dans l'obscurité, un faible courant subsiste.



Photodiode
BPW34

Sous éclairage, le courant inverse I_R est approximativement proportionnel à la puissance optique reçue (éclairement). L'augmentation de V_R améliore la rapidité, mais accroît le courant d'obscurité et le bruit.



! Note : Afin de mesurer l'éclairement, la photodiode est associée à un conditionneur à **amplificateur ALI**, qui convertit son courant I_R en une tension grâce un choix des résistances élevée de 10^5 à $10^6 \Omega$.

4.2. Phototransistor

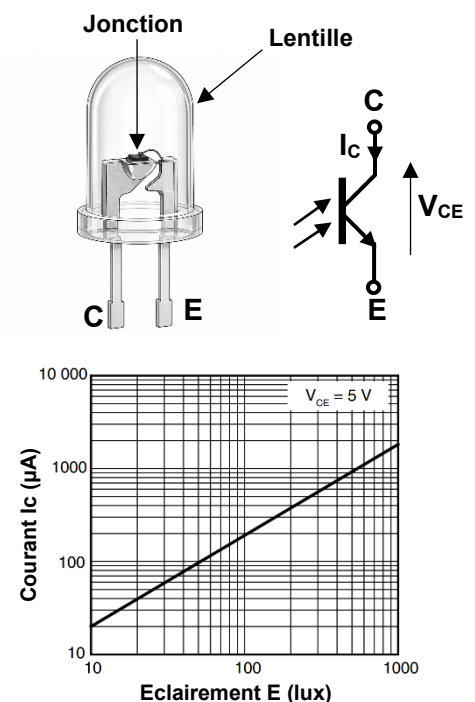
Le phototransistor est un transistor sensible à la lumière. Une lentille dirige le rayonnement vers la jonction collecteur-base, qui produit un faible courant comme une photodiode. Ce courant joue le rôle de courant de base et est amplifié par le gain β du transistor : $I_C \approx \beta I_{ph}$

Il fournit donc un courant de quelques **mA**, mais son temps de réponse, de quelques **μs**, est plus lent que celui d'une photodiode. Il convient surtout à la détection de présence, au comptage et aux automatismes.

Exemple : TEPT4400 – Vishay

TEPT4400 est un phototransistor NPN au silicium adapté à la mesure de la lumière ambiante :

- Domaine spectral : **440 à 800 nm**
- Courant lumineux typique : **200 μA à 100 lux**
- Tension de polarisation collecteur-émetteur V_{CE} : **5V**



4.3. Photorésistance (LDR)

La photorésistance (LDR) est un **capteur résistif** dont la résistance diminue lorsque l'éclairement augmente. Sa caractéristique est non linéaire : $R = K E^{-\gamma}$

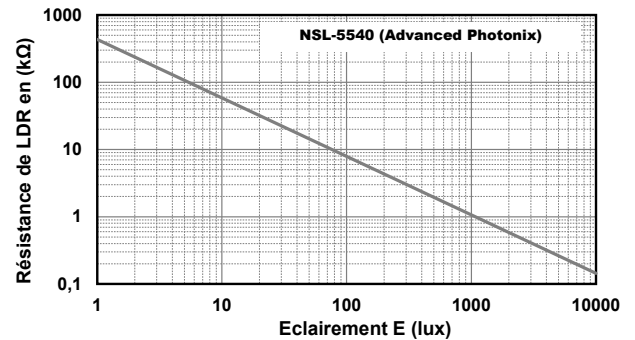
- K : constante propre à la LDR ($E = 1 \text{ Lux}$, on obtient $R = K$)
- γ : coefficient de sensibilité, généralement compris entre **0,5 et 1**.

Elle couvre une grande plage d'éclairement, mais son **temps de réponse** est **relativement lent**. Elle convient à la détection de lumière ambiante, mais pas aux variations lumineuses rapides, pour lesquelles une photodiode est préférable.

Exemple : NSL-5540 (Advanced Photonix)



- Tension maximale : **125V**
- Domaine spectral : **400 à 700 nm**
- Résistance sous **21,5 Lux** : **30 kΩ** typique
- Résistance sous **1 076 Lux** : **1 kΩ** typique
- Constante propre à la LDR : $K \approx 432\,574$
- Coefficient de sensibilité : $\gamma \approx 0.87$



5. Capteurs magnétiques : Effet HALL

Sans champ magnétique : les charges circulent dans la plaque sans déviation latérale. Elles restent uniformément réparties sur les deux côtés, donc aucune tension de Hall n'apparaît : $B = 0 \Rightarrow V_m = 0$

Avec un champ magnétique : lorsque $\vec{B}$ est perpendiculaire au courant, les charges mobiles subissent la force de Lorentz $\vec{F}_L$:

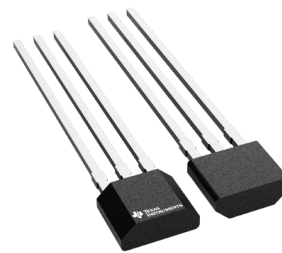
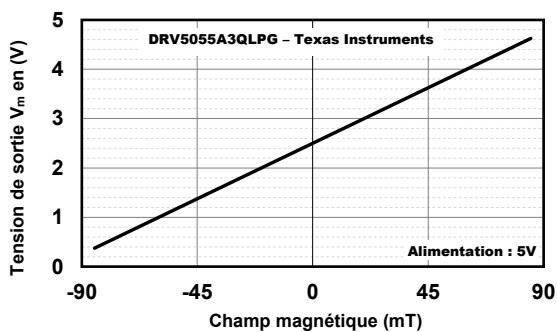
$$\vec{F}_L = q \cdot \vec{v} \wedge \vec{B} \quad \text{Avec } \vec{v} \text{ est la vitesse de déplacement des charges.}$$

Elles sont **déviées vers un côté de la plaque**, créant une accumulation de charges opposées sur les deux bords. Cette séparation produit la tension de Hall V_H : $V_H = K \cdot I \cdot B$

La tension de Hall augmente avec le courant I et le champ magnétique $\vec{B}$. L'inversion du champ inverse sa polarité.

Exemple : DRV5055A3QLPG -Texas Instruments

Application : Ce capteur est utilisé dans la pince de mesure de courants sans contact alternatifs ou continus



La **pince ampèremétrique** entoure le câble sans le couper. Le courant crée un champ magnétique, concentré par le noyau vers le capteur à effet Hall, qui le convertit en tension proportionnelle, permettant une mesure isolée et sans contact électrique.

6. Capteur de vitesse : Génératrice tachymétrique

La génératrice tachymétrique est un **capteur actif de vitesse** fondé sur la **loi de Faraday**. Accouplée à l'arbre tournant, elle délivre à vide une tension continue proportionnelle à la vitesse de rotation :

$$E = K_E \Omega \quad \text{ou} \quad E = K_N \quad \text{Avec : } \Omega = N \cdot \frac{2\pi}{60}$$

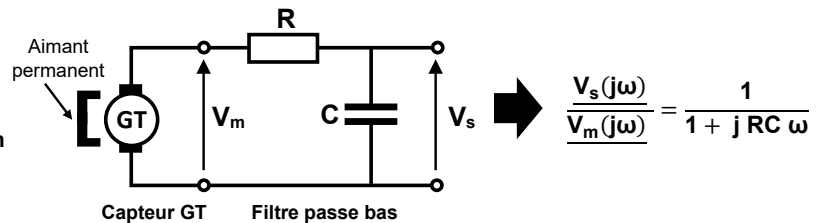


Où Ω est en rad/s et N en tr/min. Robuste et fiable, elle présente cependant **une ondulation de tension** due au collecteur et aux perturbations électromagnétiques. Un filtre passe-bas peut la réduire :



Baumer TDP0,2 LT-7 B10 55

- Sensibilité : **20 mV/(tr/min)**
- Vitesse maximale : **10 000 tr/min**
- Diamètre de l'arbre : **11 mm**



Remarque importante : Ces capteurs tachymétriques comportent des **balais**, un **collecteur** et des **pièces mobiles** soumis à l'**usure**. Ils nécessitent un **entretien**, génèrent des **ondulations** et restent sensibles aux **perturbations électromagnétiques**. Les **codeurs optiques incrémentaux** sont donc **préférables**, car ils fonctionnent **sans contact**, offrent une **meilleure précision** et délivrent des **signaux numériques exploitables**.

VI. Capteurs numériques

Les capteurs numériques mesurent une grandeur physique et délivrent directement une information binaire. Ils intègrent souvent l'élément sensible, le conditionnement, la conversion analogique-numérique et une interface de communication, facilitant ainsi leur connexion au microcontrôleur et améliorant l'immunité au bruit électrique.

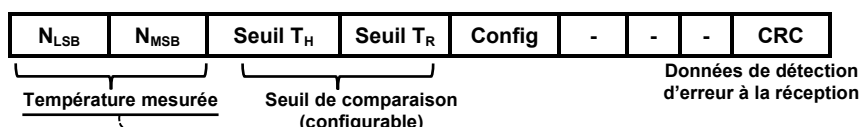
Exemple : Capteur numérique de température DS18B20

Le **DS18B20** est un capteur numérique de température mesurant de **-55 à +125 °C**, avec une précision de **±0,5 °C** entre **-10 et +85 °C**. Sa résolution est programmable de **9 à 12 bits**, soit un pas minimal de **0,0625 °C** (mode **12 bits**).

Il intègre l'élément sensible, le circuit de conversion température-numérique, une unité de traitement, une mémoire **EEPROM**, une **adresse unique de 64 bits**, un **générateur de CRC** et une interface **1-Wire**.

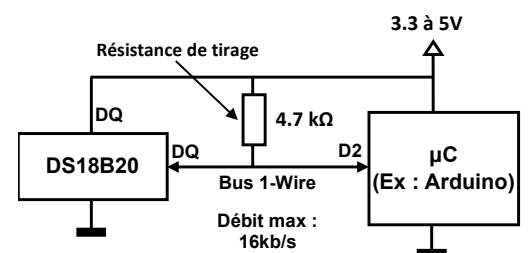
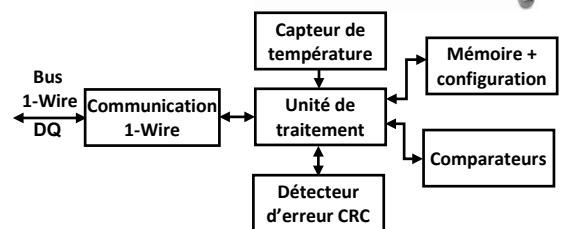
² La communication avec le microcontrôleur utilise une seule ligne de données **DQ**, associée à une résistance de tirage vers le haut (**Pull up**).

Pour mesurer la température, le microcontrôleur envoie une commande de mesure, il attend la conversion, puis DS18B20 répond par une trame de neuf (9) octets (8 bits) :



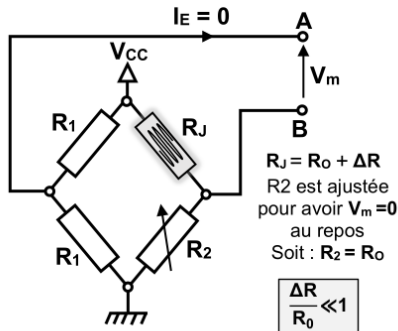
À 12 bits, la température est calculée par : $T = \frac{N_T}{16}$ avec : $N_T = (N_{MSB} \ll 8) + N_{LSB}$ ou bien : $N_T = (N_{MSB} * 16) + N_{LSB}$

Remarque : le capteur DS18B20 dispose un temps maximal de conversion varie de **93,75 ms à 9 bits à 750 ms à 12 bits** !



Références bibliographiques :

- ❏ C. François, Les grandes fonctions de la chaîne d'information - IUT, BTS, CPGE, FRANCE : Ellipses, 2016
- ❏ Pierre Tréhin, Sciences industrielles de l'ingénieur (SII) - spécial ATS, Ellipses 2019
- ❏ P. Dassonville, Les capteurs – 62 exercices et problèmes corrigés, 2^e éd., Dunod, 2013.



$$\Rightarrow V_m = V_A - V_B \quad \text{avec : } V_A = V_{cc} \times \frac{R_1}{R_1 + R_3} \Rightarrow V_A = \frac{V_{cc}}{2}$$

$$\text{et } V_B = V_{cc} \frac{R_2}{R_2 + R_4} = V_{cc} \frac{R_0}{R_0 + R_0 + \Delta R} \Rightarrow V_B = V_{cc} \frac{R_0}{2R_0 + \Delta R}$$

donc :

$$\Rightarrow V_m = V_A - V_B \Rightarrow V_m = V_{cc} \left(\frac{1}{2} - \frac{R_0}{2R_0 + \Delta R} \right) = V_{cc} \frac{2R_0 + \Delta R - 2R_0}{4R_0 + 2\Delta R}$$

donc :

$$V_m = V_{cc} \frac{\Delta R}{4R_0 \left(1 + \frac{\Delta R}{2R_0} \right)} \Rightarrow V_m \approx V_{cc} \frac{\Delta R}{4R_0} \Rightarrow S = \frac{V_m}{\frac{\Delta R}{R_0}} = \frac{V_{cc}}{4}$$