

Chapitre 2: les capteurs passifs et leurs conditionneurs

ISSATsousse

2011-2012

Plan du chapitre II

2.1. Capteurs. Généralités.

2.2. Les capteurs résistifs

2.2.1. Exemples de capteurs résistifs

2.2.2. Conditionneurs

**2.2.3. Capteurs avec conditionneurs
intégrés**

2.3. Capteurs inductifs et capacitifs

2.3.1. Capteurs inductifs

2.3.2. Capteurs capacitifs

2.1. Les capteurs

1. Généralités

Le capteur est l'élément qui va permettre sous l'effet du mesurande d'en délivrer un signal électrique exploitable. On parle aussi de transducteur.

La grandeur électrique de sortie peut être soit :

- **une charge,**
- **une tension,**
- **un courant,** dans ces 3 cas, le capteur est **actif.**
- **une impédance : R, L, ou C,** le capteur est dit **passif.**

La plupart des capteurs font intervenir plusieurs phénomènes différents. Prenons comme exemple, la mesure d'un débit :

1. Transformation du débit en une pression différentielle,
2. Transformation de la pression différentielle en déformation mécanique d'une membrane,
3. Transformation de la déformation mécanique en une grandeur électrique (par **effet piézo-électrique** par exemple).

L'ensemble de ces étapes constitue la chaîne de mesure. Si cette chaîne de mesure fait intervenir plusieurs transducteurs, on appelle **corps d'épreuve** celui en contact direct avec le mesurande.



Exemples de capteurs passifs :

Mesurande	Effet utilisé	matériau
Température	Résistivité	Platine, nickel, cuivre
Très basse température	Constante diélectrique	semi-conducteurs
Flux optique	Résistivité	Semi-conducteurs
Déformation	Résistivité Perméabilité	Alliages nickel Alliages ferromagnétiques
Position	Résistivité	Magnétorésistances : Bismuth, antimoine d'indium

Exemples de capteurs actifs :

Mesurande	Effet utilisé	Grandeur de sortie
Température	thermoélectricité	Tension
Flux électromagnétique (optique)	Photo émission Pyroélectricité	Courant Charge
Déformation, force, pression, accélération	Piézoélectricité	Charge
Position	Effet Hall	Tension
Vitesse	Induction	Tension

2.2. Les capteurs résistifs

2.2.1. Exemples de capteurs résistifs

D'une manière générale, une résistance pure R peut s'écrire:

$R = F(\mathbf{x})/\sigma$ où $F(\mathbf{x})$ est fonction de la géométrie et σ la conductivité du matériau, avec :

$$\sigma = q (\mu_p p + \mu_n n)$$

q est la charge élémentaire, et les coefficients μ sont les mobilités respectives des porteurs : trous, de densité p ou électrons, de densité n .

Un mesurande peut ainsi agir sur :

- la densité des porteurs (température ou flux lumineux)
- la mobilité des porteurs (T° , contrainte, champ magnétique)
- la géométrie.

Résistances thermométriques

- Résistances métalliques

Ces résistances ont une valeur qui croît avec la T° selon une loi de la forme :

$$R(T) = R_0 (1 + AT + BT^2 + C(T-100)T^3)$$

T est en $^{\circ}\text{C}$.

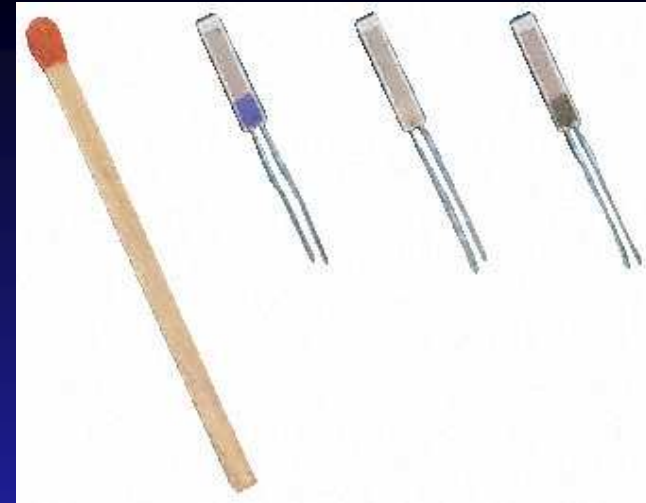
Le Pt est le métal le plus utilisé. Sa plage d'utilisation s'étend de -200°C à 1000°C . Ses valeurs forment des étalons normalisés.

Le Ni et le Cu sont d'autres métaux utilisés. Le Cu est caractérisé par une courbe très linéaire.



Pt 1000 à 2 fils

Sondes thermoélectriques:
Pt100 : 100W à 0°C.
Pt1000 : 1000W à 0°C.



Caractéristiques techniques

Norme	EN 60 751		
Coefficient de température	$\alpha = 3,850 \times 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ (entre 0 et 100 °C)		
Plage de température	-70 à +400 °C		
Tolérance	Plage de température valable pour la classe 1/3 DIN B : -50 à +200 °C Plage de température valable pour la classe A : -70 à +300 °C Plage de température valable pour la classe B : -70 à +400 °C		
Courant de mesure/Courant maximal	Pt 100	recommandé 1,0 mA	maximal 7 mA
	Pt 500	recommandé 0,7 mA	maximal 3 mA
	Pt 1000	recommandé 0,1 mA	maximal 1 mA
	Pt 2000	recommandé 0,1 mA	maximal 1 mA
	Pt 5000	recommandé 0,1 mA	maximal 1 mA

Exemple : $R=100(1+\alpha T)=138,5\Omega$ à 100°C

- Thermistances

Ce sont des mélanges agglomérés d'oxydes métalliques.

Leur résistance décroît avec la T° selon une loi du type :

$$R(T) = R_0 \exp (B (1/T - 1/T_0))$$

T est ici exprimée en K. (B entre 3000 et 5000K). Les thermistances sont généralement utilisables jusqu'à environ 300°C . Mais du fait de la forme de leur réponse, elle ne sont utilisées que sur une faible plage de température (100°C) où elles sont très sensibles (sensibilité environ **10 fois supérieure** aux sondes métalliques).



Thermistance de précision à capsule de verre

On choisit une thermistance de faible valeur à 25°C (ex. 100Ω) pour mesurer des faibles températures, et une thermistance de valeur élevée (100 à 500 KΩ à 25°C) pour mesurer des températures élevées.

L'expression $R(T) = R_0 \exp (B (1/T - 1/T_0))$ est la plus utilisée mais est une forme condensée de $R(T) = R_0 (T/T_0)^{-b} \exp (B (1/T - 1/T_0))$. Ainsi, dans la forme courante, B dépend de la température (peut être assimilé comme constant sur une plage limitée).

R_{25}	No. of R/T characteristic	$B_{25/85}$	$B_{0/100}$	$B_{25/100}$
Ω		K	K	K
2 k	8401	3420	3390 ± 1 %	3436
5 k	8402	3480	3450 ± 1 %	3497
10 k	8407	3480	3450 ± 1 %	3497
20 k	8415	3992	3970 ± 1 %	4006
30 k	8415	3992	3970 ± 1 %	4006
50 k	8403	3992	3970 ± 1 %	4006
100 k	8404	4066	4036 ± 1 %	4085
230 k	8405	4240	4537 ± 1 % ¹⁾	4264
1400 k	8406	4557	5133 ± 2 % ²⁾	4581

Les thermistances n'ayant pas une caractéristique linéaire mais étant très sensibles, ils sont particulièrement adaptés aux problèmes de régulation.

Remarque :

Il existe aussi des résistances de silicium, à coefficient de température positif (CTP) dans sa plage de mesure (0,7%/°C à 25°C). Il ya aussi la CTN

Le procédé de fabrication assure de très bonnes qualités d'interchangeabilité, en revanche, leur plage de mesure est assez faible : -50°C à +120°C par exemple.

Au-delà, leur caractéristique s'inverse.



Jauges de déformation: jauges extensométriques

Mesures de déplacement et jauges d'extensométrie

Caractéristiques importantes

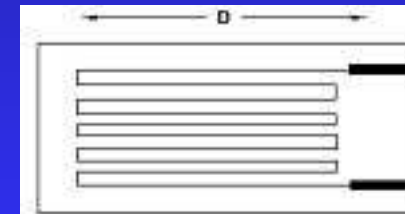
- Méthode d'extensométrie **indirecte**, ponctuelle, qui se pratique sur des prototypes réels
- La jauge est un **capteur passif** qui nécessite un circuit de conditionnement
- C'est la technique d'analyse expérimentale des contraintes **la plus utilisée** actuellement pour les raisons suivantes:
 - Fiabilité des mesures
 - Précision obtenue ($1 \mu\text{m}/\text{m}$)
 - Simplicité de mise en oeuvre par rapport à d'autres méthodes
 - Possède une chaîne de mesure efficace et performante
 - Coût faible par rapport aux autres méthodes

Mesures de déplacement et jauges d'extensométrie

Mesure résistive de déplacement : on peut, de manière évidente, mesurer un déplacement en limitant à une longueur l (ou un angle α) une résistance de longueur L et de résistance totale R_n . On a : $R = l/L R_n$.

Les jauges sont des éléments résistifs (métaux, semi-conducteurs) déposés sur un substrat isolant solidaire de la structure dont on veut mesurer la **déformation** $\Delta l/l$.

Pour la jauge, on aura une variation proportionnelle à la déformation, qui sera donnée par :



$$\Delta R/R = K \Delta l/l$$

K est appelé **facteur de jauge** et vaut entre 2 et 4 pour les résistances métalliques ou entre 50 et 200 pour les jauges à semi-conducteur.

Les jauges de déformation sont **surtout utilisées comme mesure secondaire dans un capteur comprenant un corps d'épreuve**, une structure mécanique sur laquelle est fixée la jauge.

Exemple :

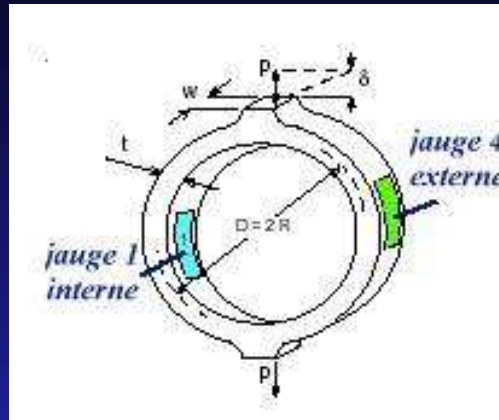
Mesurande
Force
Pression
Accélération

Corps d'épreuve
anneau
diaphragme
masse sismique

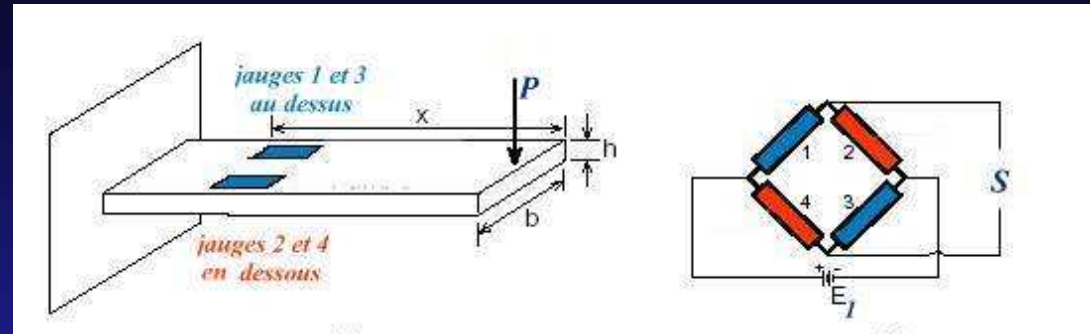
Capteur industriel de force



Capteur en anneau :



Capteur en poutre :



Dans ces 2 exemples, La force s'applique différemment suivant les éléments résistifs. Ainsi, à l'extrémité de la poutre, les deux jauges au dessus seront en **extension** tandis que les deux jauges inférieures seront **comprimées**. Il en résulte dans le montage en pont un signal S peu sensible aux variations de température qui affecte les résistances de la même façon.

Les jauges de contrainte

Il s'agit simplement de fils ou de circuits résistifs que l'on peut coller sur une structure dont on veut connaître les déformations locales. Ces résistances occupent une place considérable dans le marché des capteurs de déformations. Leur aptitude à travailler dans les conditions les plus courantes et leur faible coût explique ce succès. A ces atouts connus de longue date s'ajoute aujourd'hui l'intégration des jauges qui permet d'une part de produire des capteurs de très petites dimensions aux résolutions remarquables et d'autre part de les associer à des corps d'épreuve et des conditionneurs qui améliorent très sensiblement les sensibilités et rapports signaux à bruit. Suivant les réalisations, les allongements relatifs mesurables vont de 10^{-7} à 10^{-1} .

Les jauges sont réalisées sous forme de fils ou de dépôts minces. Pour un fil de section S et de longueur l constitué d'un matériau de résistivité ρ , l'expression de la résistance R donnée par:

$$R = \frac{\rho l}{S}$$

$$\frac{dR}{R} = \frac{dl}{l} - \frac{dS}{S} + \frac{d\rho}{\rho}$$

$$\frac{dS}{S} = 2 \frac{dD}{D} \text{ et } \frac{dD}{D} = -\nu \frac{dl}{l}$$

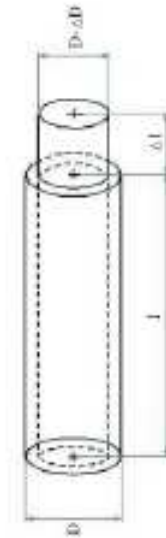
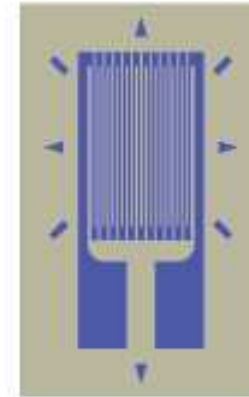
$$\rightarrow \frac{dR}{R} = \frac{dl}{l} (1 + 2\nu) + \frac{d\rho}{\rho}$$

$$\rightarrow \frac{dR}{R} = \frac{dl}{l} (1 + 2\nu) + C \frac{dV}{V}$$

$$\text{et } \frac{dV}{V} = \frac{dl}{l} + \frac{dS}{S} = \frac{dl}{l} (1 - 2\nu) \quad \rightarrow \frac{dR}{R} = \frac{dl}{l} (1 + 2\nu) + C \frac{dl}{l} (1 - 2\nu) = K \frac{dl}{l}$$

$$\nu = 0.3, C = 1 \rightarrow \text{facteur de jauge } K = 2$$

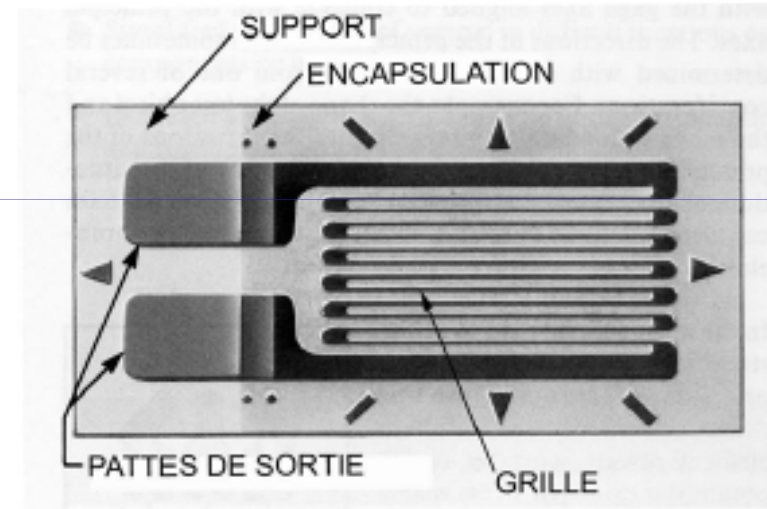
Jauge de contrainte



L'effet piézorésistif traduit la diminution de résistivité sous l'effet de la pression et C est la constante de Bridgman.

Qu'est-ce qu'une jauge?

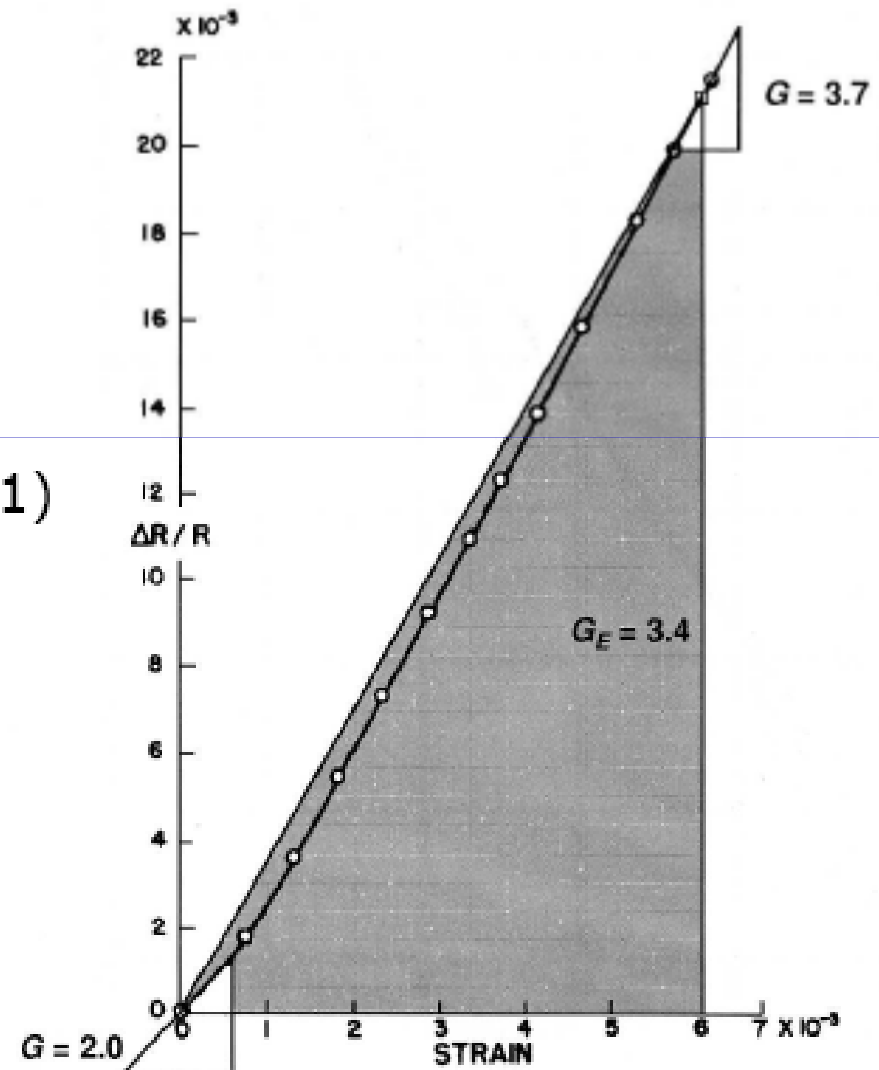
- Petit **élément résistif** qui est collé sur une pièce au point où on veut mesurer la déformation
- Fait d'un fil fin **aligné** selon une direction préférentielle et collé à la pièce par l'entremise d'un support d'isolation
- La déformation de la pièce est transmise à travers la colle et le support à la jauge. Un changement proportionnel de sa **résistance** en résulte



Sensibilité du conducteur à la déformation (S_A)

Pour un fil conducteur subissant une déformation axiale

$$S_A = \frac{\Delta R/R}{\Delta L/L} = \frac{\Delta R/R}{\varepsilon_A} \quad (1)$$



Sensibilités des alliages métalliques utilisés dans la fabrication des jauges

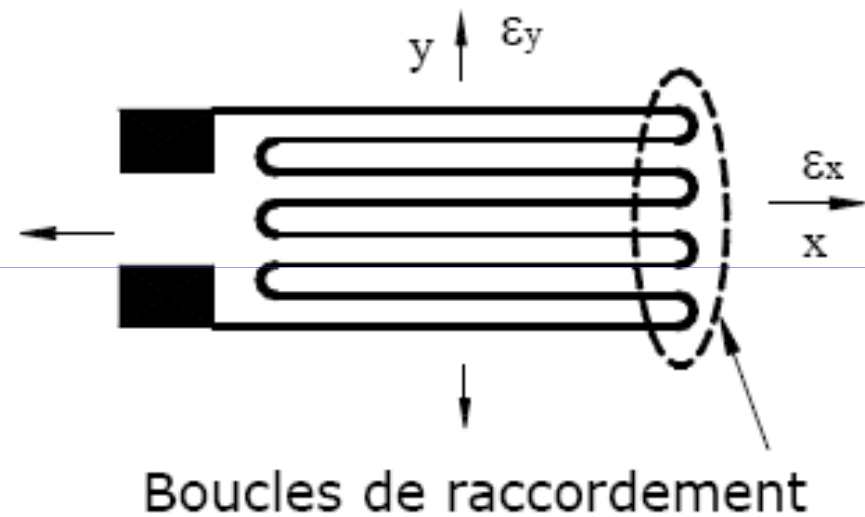
Matériau	Composition	S_A
Advance ou Constantan	45 Ni, 55 Cu	2.1
Karma	74 Ni, 20 Cr, 3 Al, 3 Fe	2.0
Isoélastique	36 Ni, 8 Cr, 0.5 Mo, 55.5 Fe	3.6
Nichrome V	80 Ni, 20 Cr	2.1
Platine - Tungstène	92 Pt, 8 W 70	4.0
Armour D	70 Fe, 20 Cr, 10 Al	2.0

Le facteur de sensibilité transversale K

$$\frac{\Delta R}{R} = S_{xx} \cdot \varepsilon_x + S_{xy} \cdot \varepsilon_y$$

$$K = \frac{S_{xy}}{S_{xx}}$$

$$\frac{\Delta R}{R} = S_{xx} (\varepsilon_x + K \varepsilon_y)$$



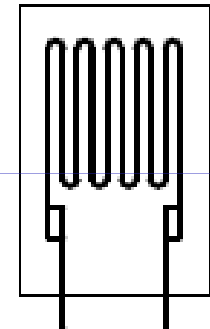
K typiques: 1 à 5% pour jauges à fils ($K=0.01$ à 0.05)
0.3% à 3% pour jauges à trame ($K=0.003$ à 0.03)

Les jauges en constantan

- Matériau le plus utilisé dans les applications courantes
- **Sensibilité constante** (S_A) pour des très grandes déformations même au-delà du point d'écoulement
- **Résistivité élevée** ($\rho = 50 \times 10^{-6} \Omega \cdot \text{cm}$), donc grande résistance pour de petites longueurs ce qui permet de fabriquer de très petites jauges
- **Très stable** et relativement peu affecté par les changements de température (ΔT)

Jauges à fil tramé (peu utilisées)

- En général 10 à 12 cm de constantan de diamètre 0.025 mm pour une résistance totale de 120 Ω
- Trame plate - longueur minimum 6 mm
- Bobine aplatie - longueur minimum 0.25 mm
- Support: Papier, plastique, souvent temporaire
- Autocompensation en température **difficile**
- Facteur de sensibilité transversale (K) plus grand que pour les jauges à trame pelliculaire
- Pour des applications spéciales comme la haute température



Jauges à trame pelliculaire

- Fabriquées par **photogravure** (plusieurs géométries possibles)
- Possibilité de **combiner plusieurs jauges sur un seul support** (rosettes)
- Constituent la **majorité des jauges** que l'on retrouve sur le marché aujourd'hui
- Grille très mince (0.004 mm) et grande variété des dimensions (0.2 mm à 50 mm et plus)

Jauges à trame pelliculaire (suite)

- Support mince (0.013 mm) et très flexible (époxy ou polyimides)
- Variété de résistances disponibles: 120, 350, 1000, 5000 Ω
- Bonne adhésion et dissipation de chaleur
- Bonne autocompensation en température
- Diminution de l'effet transversal par boucles de raccordement épaisses

Jauges à élément semi-conducteur

- Matériau: Silicium dopé avec des impuretés
- **Très grande sensibilité** ($60 < S_A < 200$)
- Sensibilité transversale très faible ($K \approx 0$)
- Variation facile des propriétés par le contrôle du dopage des impuretés (S_G de -140 à +175, R de 100 à 1 pour la même géométrie)
- **Très fragiles**
- Utilisées pour la mesure de petites déformations avec grande précision
- S_G **varie** avec la déformation et la température
- Requièrent des circuits de conditionnement spéciaux

Les principaux types de support

- **Résines d'époxydes**

épaisseur de 0.01 à 0.03 mm, 100°C max.

- **Résines d'époxydes + fibres de verre**

-200° < T < 350°C, mais l'élongation est réduite à 2% maximum

- **Les polyimides**

Très flexibles et robustes, 20% d'élongation

Cryogénique < T < 250°C

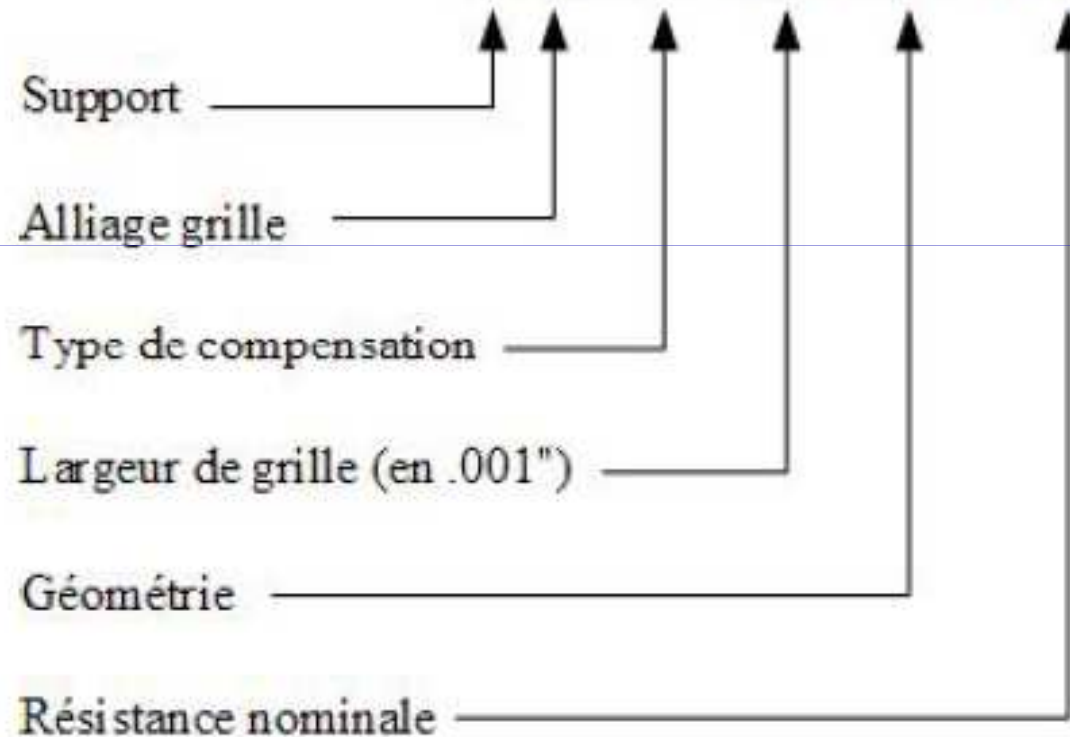
Colle à base de céramique

- Pour des applications entre 200°C et 800°C
- Utilisée avec des jauges à support temporaire
- **Colle très fragile**, pour des petites déformations seulement
- Très délicat d'utilisation



Codes des jauges

EA-06-250BB-120



Applications des jauges de déformation

Applications

Surveillance de pylônes en composites (STRUCTURES)

Deux capteurs sont collés suivant l'axe longitudinal à la base des pylônes. Ils sont disposés à 90° sur la circonférence. En faisant la somme quadratique des deux signaux, on surveille à tous moments les sollicitations dues au vent dans toutes les directions.

Un étalonnage spécifique permet de compenser les caractéristiques particulières en dilatation du matériau composite.

Avantage du capteur :

- Grande simplicité d'utilisation
- Les capteurs peuvent être pré-installés avant livraison
- Adaptation possible aux caractéristiques mécaniques et thermiques du matériau.



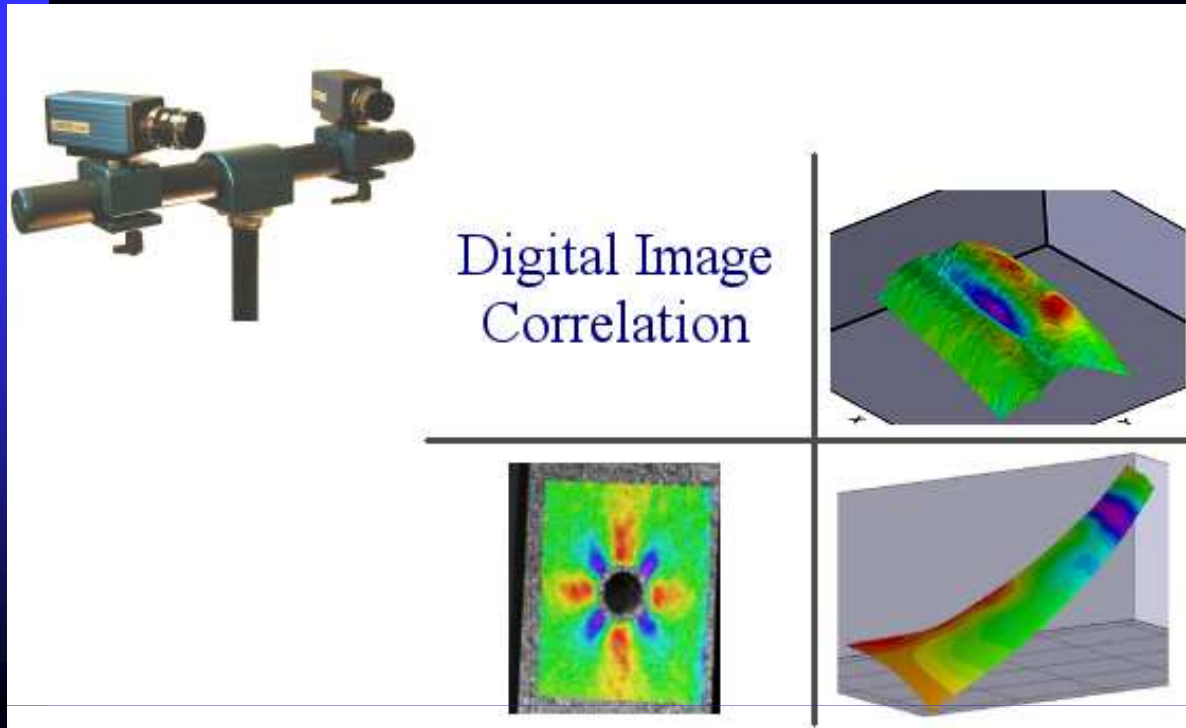
Mesure de déformations sur des structures de voitures ferroviaires (FERROVIAIRE)

Plusieurs capteurs sont collés sur les éléments déformables à des endroits prédéterminés par calcul aux éléments finis, pour vérifier la résistance de la structure aux sollicitations d'écrasement.

Avantage du capteur :

- Grande simplicité d'installation
- Gain de temps considérable par rapport à l'installation de jauges de contrainte





Mesure de déplacement et de déformation en 3D sans contact d'objets de tout type de géométrie.

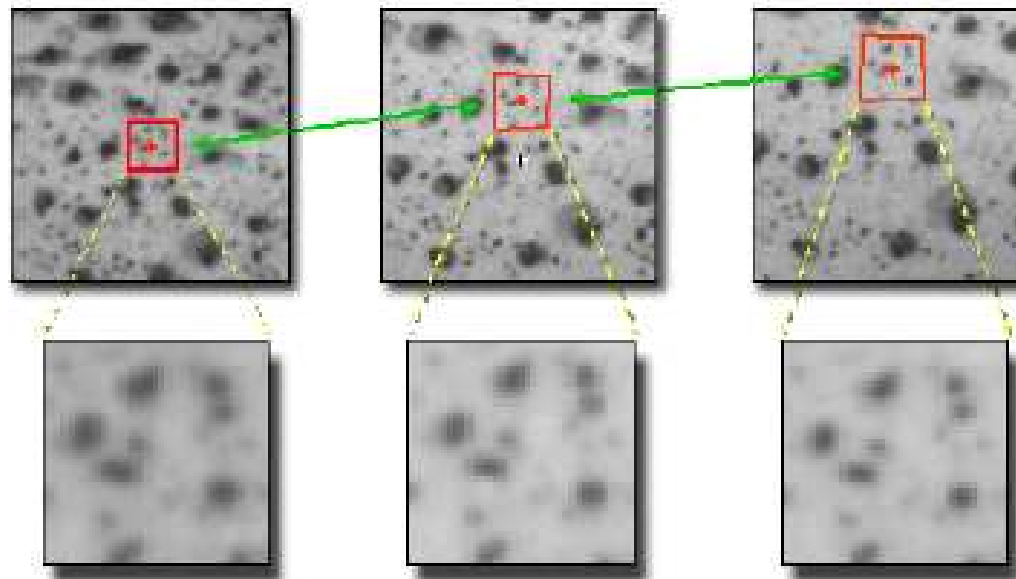
Deux caméras numériques enregistrent le processus de déformation et les images sont analysées avec un algorithme de **corrélation d'images** dont le résultat a une précision inférieure au pixel. Pour chaque point de l'objet (ou pixel de la cellule de la caméra), les composantes des déplacements et des déformations sont calculées (tel que E_{xx} , E_{yy} , E_{xy} , E_1 , E_2). Le système est utilisable pour des événements quasi-statiques ou hautement dynamiques selon le type de caméras utilisées. Les objets étudiés doivent présenter un aspect moucheté (structure stochastique) naturel ou préparé spécialement. Les mouvements de corps rigides sont pris en compte dans le calcul de déformation.

Champs d'application:

Analyse des matériaux et essais de stabilité, détermination des paramètres des matériaux, test de composants, utilisation sur des machines de traction, validation de calculs aux éléments finis, exploration de fissures, mesure sur des composants d'avions (A380 en mode statique et dynamique), essais dynamiques, crashtests, essais de sécurité des piétons et optimisation des systèmes d'airbags.

Corrélation d'images numériques

- Méthode optique de mesure de déformation sur la surface d'un objet
- La méthode consiste à suivre, pendant la déformation, les niveaux de gris d'un secteur au voisinage d'un point, en rouge sur les images ci-dessous.
- Secteur = "subset" en anglais ou "imagerie" en français



Jauges à résistance électrique

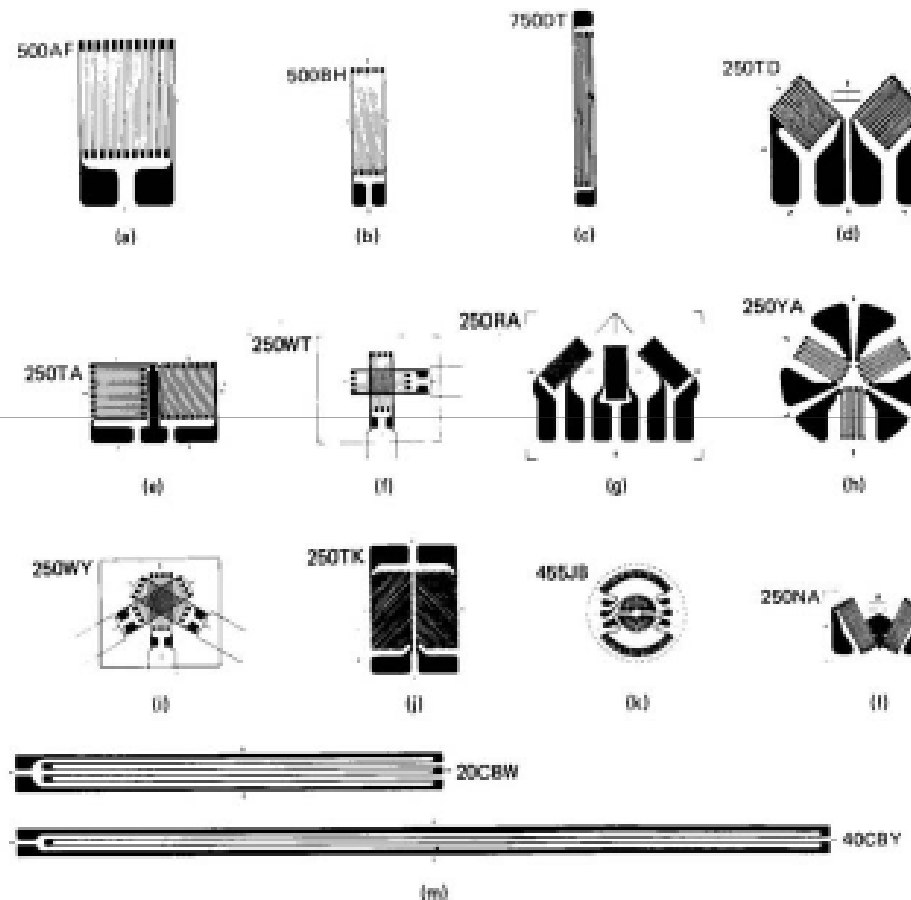


Figure 3-3 Selection of metal-foil electrical-resistance strain gages: (a) single-element gage; (b) single-element gage; (c) single-element gage; (d) two-element rosette; (e) two-element rosette; (f) two-element stacked rosette; (g) three-element rosette; (h) three-element rosette; (i) three-element stacked rosette; (j) torque gage; (k) diaphragm gage; (l) stress gage; (m) single-element gages for use on concrete. (Courtesy of Measurements Group, Inc.)

Epsimetal

Extensomètre Strain sensor

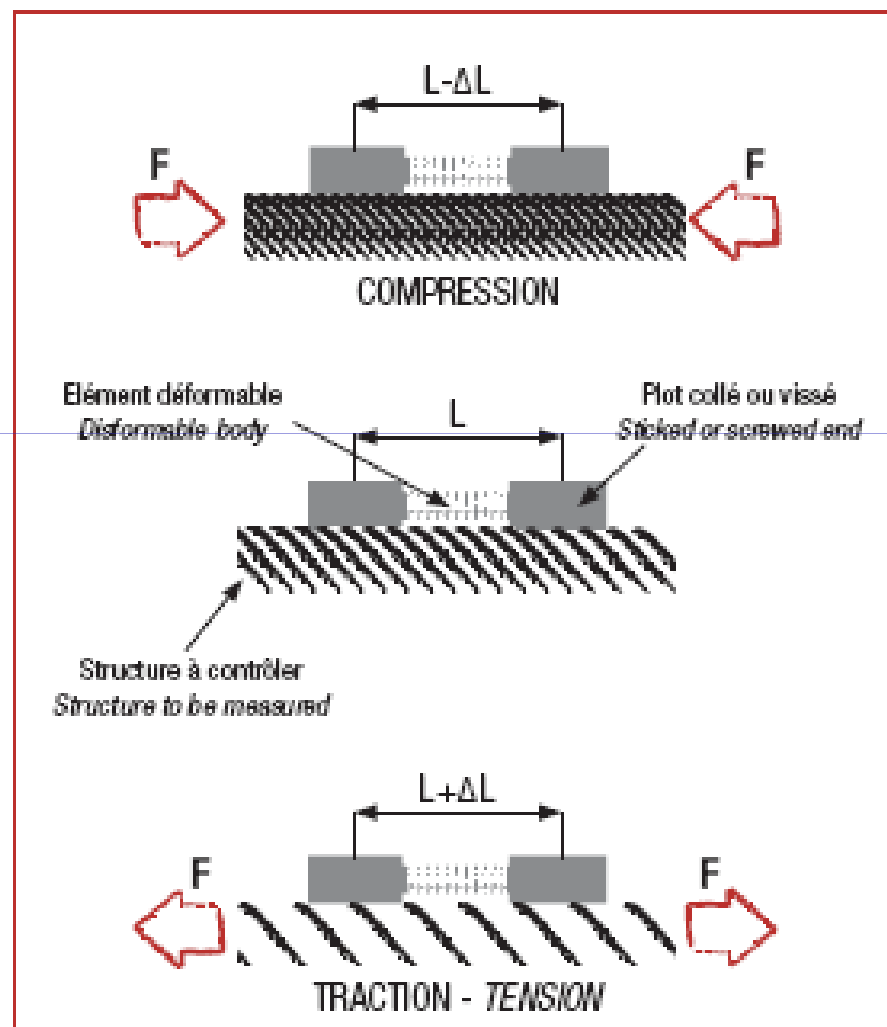
Fonctionnement - Applications

Epsimetal mesure les déformations d'une pièce soumise à des efforts. Plusieurs innovations simplifient grandement la mesure des contraintes et permettent de généraliser son emploi pour la mesure de :

- déformation
- ouverture de fissures
- contrainte
- force, couple, masse, poids
- flèche de poutre
- niveau (massique)
- surveillance
- allongement de câbles
- allongement de tirants
- allongement de haubans
- ...

Epsimetal measures the strains of a structure under load. The measurement of stresses and strains is very easy, due to a very innovative concept, and it allows a general purpose use for direct or indirect measurement.

- strain
- stress
- crack
- load, strenght, weight
- beam loading
- level in a silo
- machine frame monitoring
- overload
- tightening of a stay
- tie rods loading
- lenghtening of a cable
- ...



2.2.2. Les conditionneurs des capteurs résistifs.

Il faut distinguer 2 types de mesure :

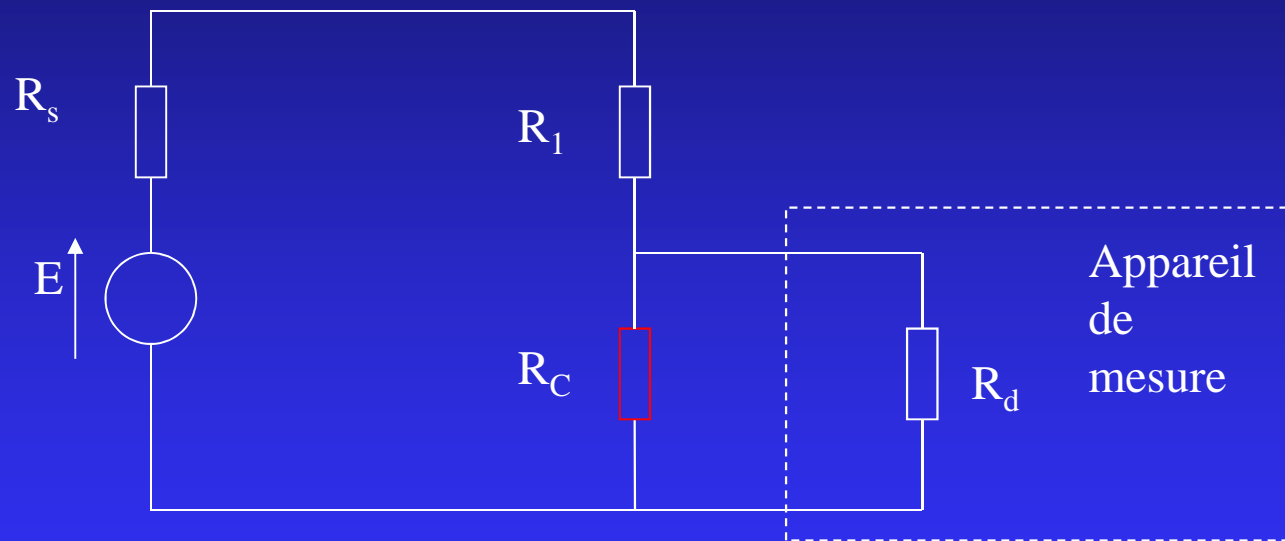
1) **La mesure de résistances R** (exemple sonde de platine : Pt).

Pour s'affranchir des variations de résistances des fils de liaison, on adopte souvent un montage appelé montage « 4 fils » par source de courant.

2) **La mesure de variations de résistances** (exemple : faibles variation ΔT en régulation, par thermistance). Le montage utilisé est le montage en **pont de Wheatstone**. On utilise souvent un montage appelé montage « 3 fils ».

1) La mesure de résistances

Montage potentiométrique :



On montre : $V_m = E \frac{R_C R_d}{R_C(R_s + R_1) + R_d(R_s + R_1 + R_C)}$

Dans l'expression :

$$V_m = E (R_C R_d) / (R_C(R_s+R_1) + R_d(R_s+R_1+R_C))$$

Si $R_d \gg R_C$ alors :

C'est le principe de base de la mesure de R_C mais V_m n'est pas une fonction linéaire de R_C .

Si une linéarisation est nécessaire, plusieurs solutions sont possibles. Ecrivons les variations de V_m en fonction de celles de R_C :

$$V_m = E \frac{R_C}{R_C + R_1 + R_s}$$

$$V_{m0} + \Delta V_m = E \frac{R_{C0} + \Delta R_C}{R_{C0} + R_1 + R_s} \frac{1}{1 + \frac{\Delta R_C}{R_{C0} + R_1 + R_s}}$$

3 solutions :

- Alimentation par source de courant

C'est-à-dire, une alimentation avec R_s très élevée $\gg R_C + R_1$
Alors on obtient :

$$V_m = E R_C / R_s \text{ ou } V_m = I_s R_C$$

- Fonctionnement en petits signaux

C'est le cas quand $\Delta R_C \ll R_{C0} + R_1 + R_s$
On a alors :

$$\Delta V_m = E \frac{(R_s + R_1) \Delta R_C}{(R_{C0} + R_1 + R_s)^2}$$

Et si on choisit $R_s + R_1 = R_{C0}$ (soit en pratique $R_1 = R_{C0}$), la sensibilité est maximale et :

$$\Delta V_m = \frac{E}{4} \frac{\Delta R_C}{R_{C0}}$$

- Montage *Push-Pull*

La résistance fixe est un second capteur identique à R_C mais fonctionnant **en opposition** : $R_{C0} - \Delta R_C$. (2 résistances d'une jauge d'extensométrie subissant des **déformations contraires**)

Alors :

$$V_{m0} + \Delta V_m = E \frac{R_{C0} + \Delta R_C}{R_{C0} + \Delta R_C + R_s + R_{C0} - \Delta R_C}$$

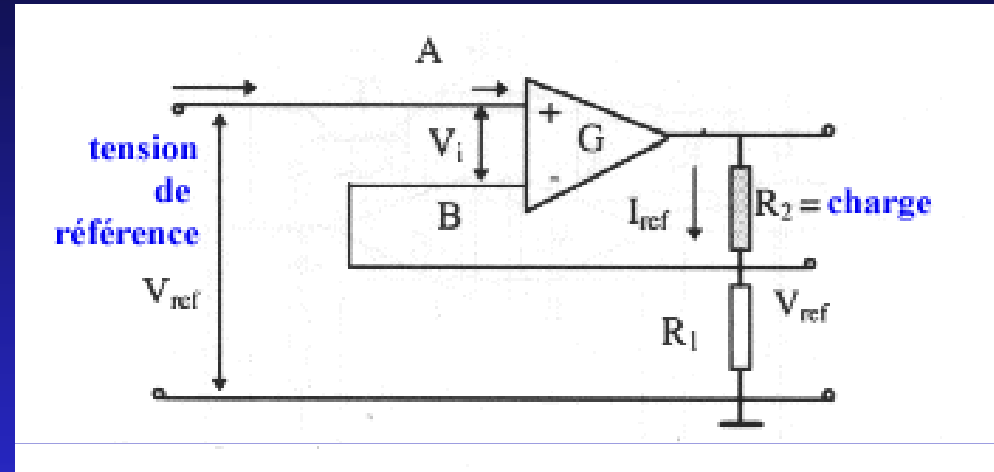
Et :

$$\Delta V_m = E \frac{\Delta R_C}{2R_{C0} + R_s}$$

En résumé :

On peut obtenir facilement $\Delta V = k \cdot \Delta R_c$ mais pour avoir $V = k \cdot R_c$, il faut utiliser une source de courant.

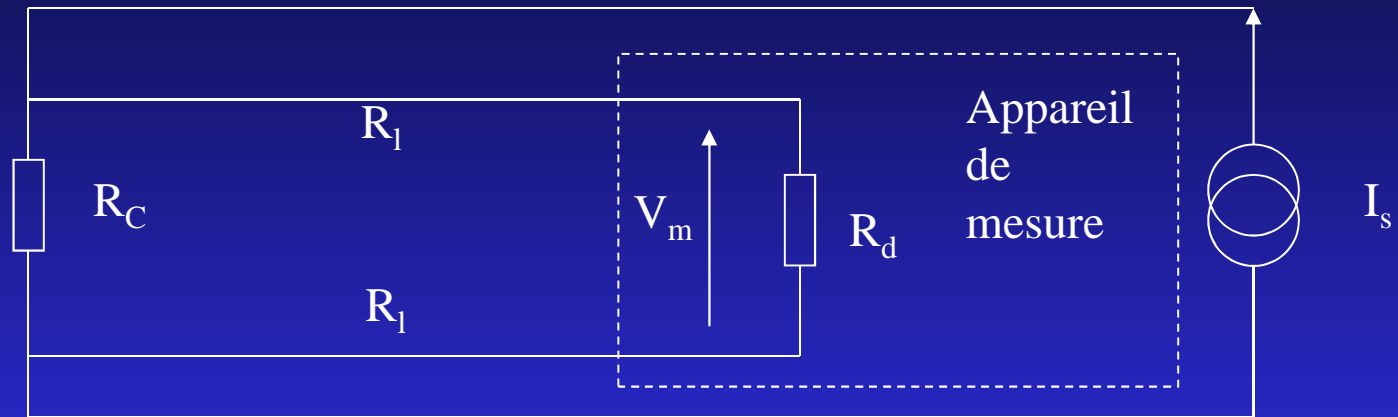
Obtention d'une source de courant par AOP :



Effet de la résistance des fils de liaison.

On utilise le montage dit « 4 fils » :





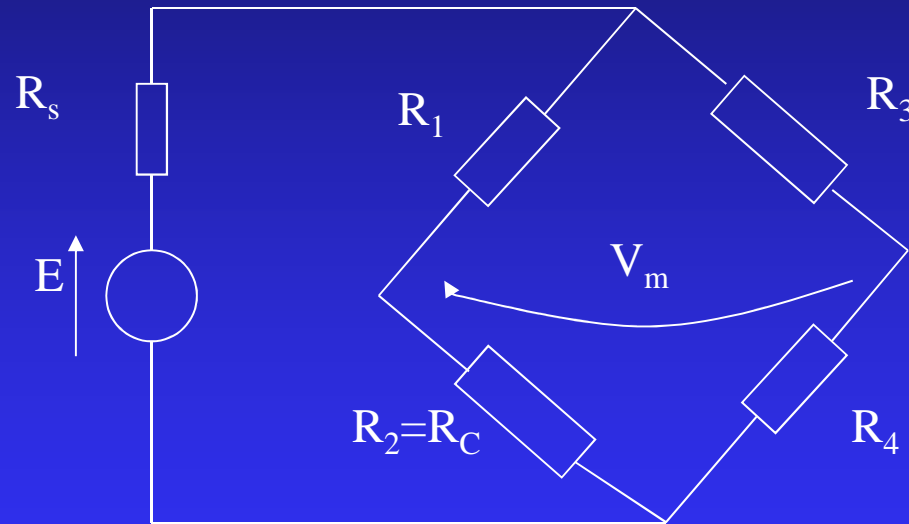
$$V_m = \frac{R_C R_d}{R_C + R_d + 2R_1} \cdot I_s$$

Si $R_d \gg R_1$ et $R_d \gg R_C$, alors : $V_m = I_s \cdot R_C$

Remarque : dans tous les montages potentiométriques, la mesure est directement sensible aux variations de E , ou de I_s .
Les montages en pont permettent de s'en affranchir.

2) La mesure de variations de résistance

Montage en pont de Wheatstone :



On peut établir : $V_m = R_d i_d$
 $= R_d I_d (R_2 R_3 - R_1 R_4) / (R_1 R_4 (R_2 + R_3) + R_2 R_3 (R_1 + R_4) + R_s (R_1 + R_3) (R_2 + R_4) + R_d (R_1 + R_2) (R_3 + R_4) + R_d R_s (R_1 + R_2 + R_3 + R_4))$

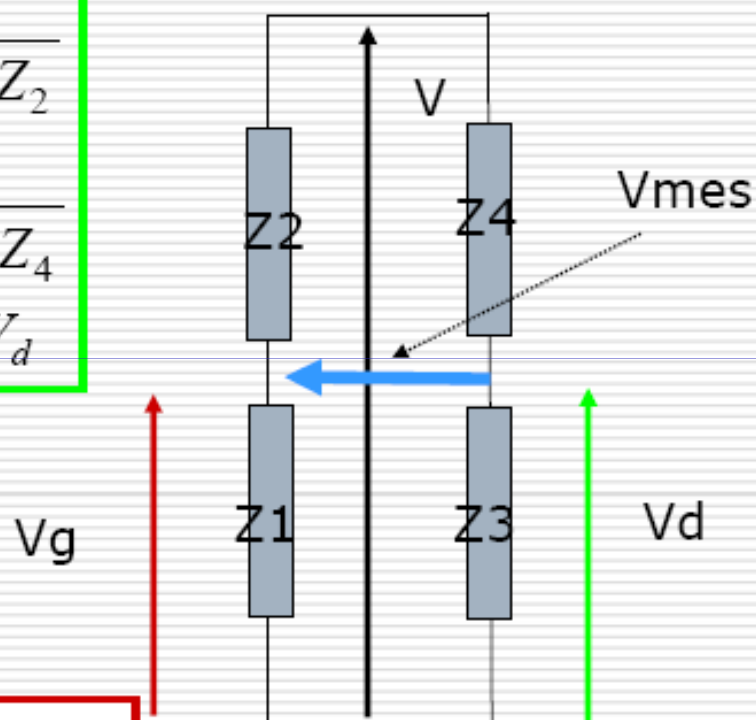
Le principe de base du pont

- Mesure d'une tension de déséquilibre
- On néglige l'effet des impédances d'entrée des appareils de mesure
- Une des impédances est le capteurs
- Les autres servent à **équilibrer**, à **linéariser** ou **compenser** les grandeurs d'influence

$$V_g = V \frac{Z_1}{Z_1 + Z_2}$$

$$V_d = V \frac{Z_3}{Z_3 + Z_4}$$

$$V_{mes} = V_g - V_d$$



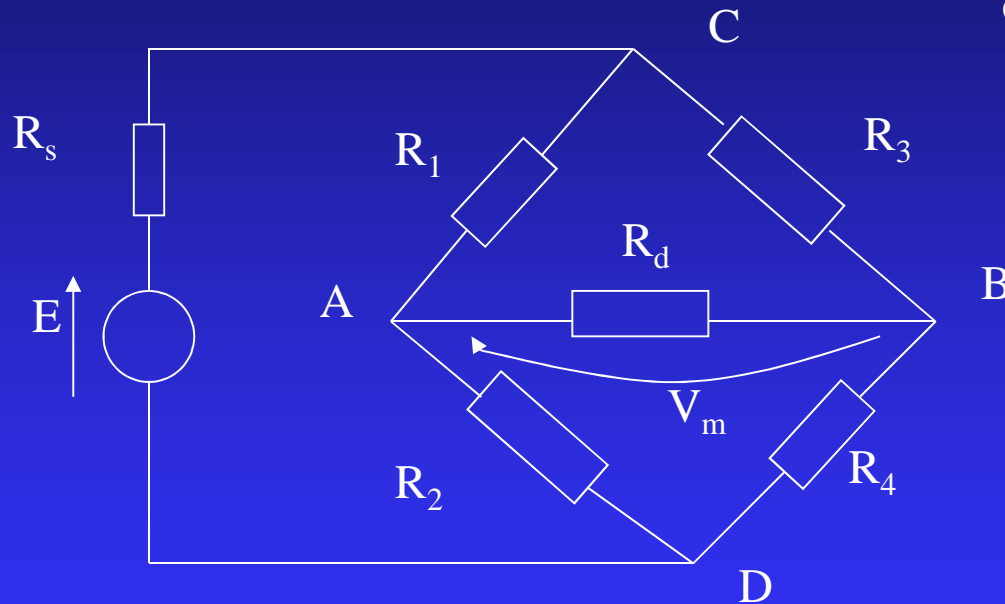
$$V_{mes} = 0 \Leftrightarrow \frac{Z_1}{Z_1 + Z_2} - \frac{Z_3}{Z_3 + Z_4} = 0 \Leftrightarrow Z_1 Z_4 = Z_2 Z_3$$

Cas de résistances pures: Pont de Wheastone

Equation générale, Condition d'équilibre

Le pont est dit **équilibré**
quand $V_A = V_B$ ce qui
correspond à la condition
classique :

$$R_1 R_4 = R_2 R_3$$



→ La condition d'équilibre ne dépend que des résistances du pont et est indépendante de la source ou du détecteur.

L'expression de la tension de déséquilibre V_m se simplifie si on admet (source d'impédance de sortie faible) : $R_s \ll R_1, R_2, R_3, R_4$ et $R_d \gg R_1, R_2, R_3, R_4$ (dispositif de mesure à grande impédance d'entrée). Alors :

$$V_m = E \frac{R_2 R_3 - R_1 R_4}{(R_1 + R_2)(R_3 + R_4)}$$

Le pont est un double montage potentiométrique. Ainsi, sa sensibilité est maximale quand $R_1=R_2$ et $R_3=R_4$

Le plus souvent : $R_1=R_2=R_3=R_4=R_0$

Les calculs sont donc similaires à celui du montage potentiométrique.

1er cas. Considérons que 3 résistances sont fixes $R_1=R_3=R_4=R_0$ et

$$R_2=R_C=R_0+\Delta R_C$$

Alors :

$$V_m = \frac{E}{4} \frac{\Delta R_C}{R_0}$$

2^{ème} cas: 2 résistances sont variables : R_1 et R_2 . (montage en demi-pont). V_m s'écrit :

$$V_m = \frac{E}{4} \frac{\Delta R_2 - \Delta R_1}{R_0} \frac{1}{1 + \frac{\Delta R_1 + \Delta R_2}{2R_0}}$$

Si le montage est de type **Push-Pull**, $\Delta R_2 = - \Delta R_1 = \Delta R$ et on a:

$$V_m = \frac{E}{2} \frac{\Delta R}{R_0}$$

Cas de deux résistances variables

- Exemple: jauges extensométriques
- Deux déformations égales et de signe opposé (push pull)
- Elimination de la variation de la résistance des fils de liaison R_l qui est commune -et disparaît dans la différence-

$$R_3 = R_4 = R_0$$

$$R_1 = R_0 + \Delta R_1$$

$$R_2 = R_0 + \Delta R_2$$

$$v_m = \frac{\Delta R_2 - \Delta R_1}{R_0} \frac{1}{1 + \frac{\Delta R_1 + \Delta R_2}{2R_0}} \frac{E_a}{4}$$

$$v_m = \Delta R_2 - \Delta R_1 \frac{1}{1 + \frac{\Delta R_1 + \Delta R_2}{2R_0}} \frac{I_a}{4}$$

Possibilité de compenser. Exemple:

$$\Delta R_2 = -\Delta R_1 = \Delta R \Rightarrow v_m = \frac{\Delta R}{R_0} \frac{E_a}{2}$$

3^{ème} cas. 4 résistances sont variables et le montage est de type Push-Pull, $\Delta R_2 = - \Delta R_1 = \Delta R_3 = - \Delta R_4 = \Delta R$ et l'expression ci-dessus est encore valable (montage en pont entier).

C'est le cas des capteurs de pression par jauge d'extensométrie.

Prise en compte de l'influence de la résistance des fils de liaison.

Lorsque le capteur est composé d'une seule résistance, une thermistance par exemple, et se trouve éloigné des autres parties du pont, la variation de la résistance des fils de liaison peut devenir non négligeable.

Enfin: Système à quatre résistances variables

- Exemple: capteur de pression constitué de 4 jauges extensométriques montées en pont sur un diaphragme

$$R_1 = R_0 + \Delta R$$

$$R_2 = R_0 - \Delta R$$

$$R_3 = R_0 - \Delta R_1$$

$$R_4 = R_0 + \Delta R_1$$



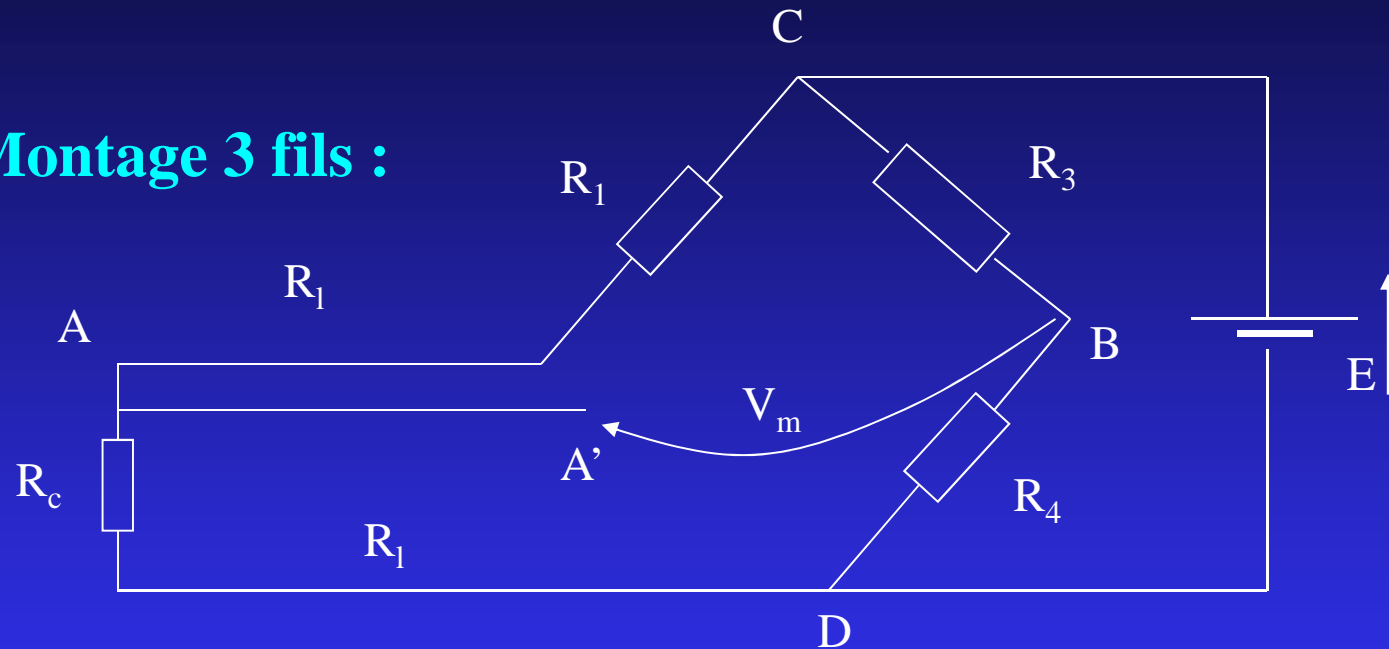
$$v_m = -\frac{\Delta R}{R_0} E_a$$

ou

$$v_m = -\Delta R \cdot I_a$$

Push pull + compensation d'une grandeur d'influence

Montage 3 fils :



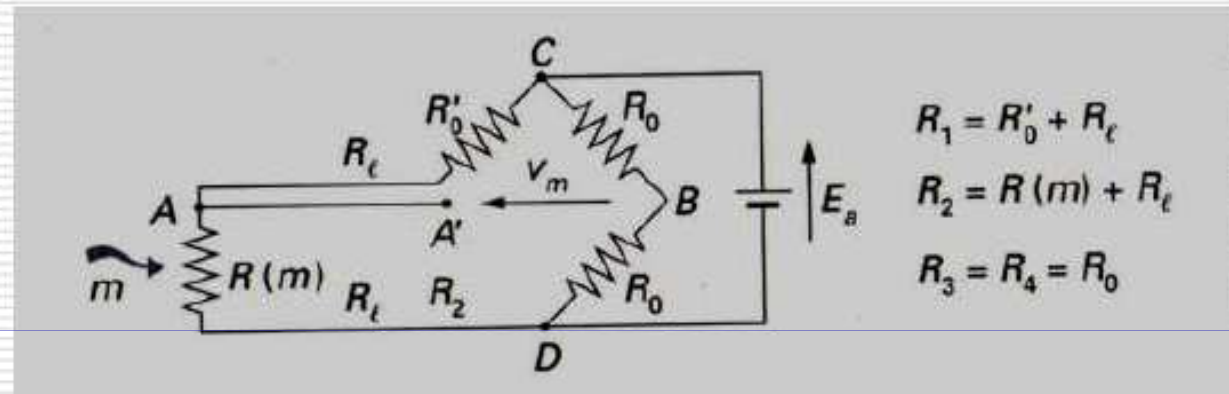
Ainsi, R_1 (et ses variations ΔR_1) se retrouve sur R_1 comme sur R_2 et ne participe pas au déséquilibre du pont.

Montage 3 fils

- élimination de la résistance des fils de liaison

$$\Delta R_1 = \Delta R_l$$

$$\Delta R_2 = \Delta R + \Delta R_l$$



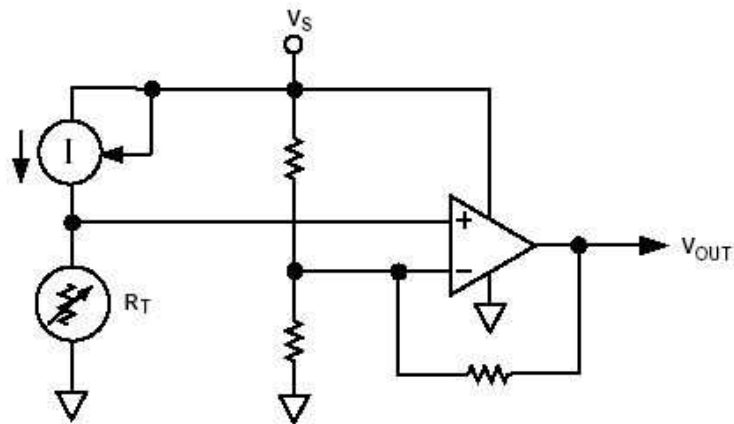
$$v_m = \frac{\Delta R_2 - \Delta R_1}{R_0} \frac{1}{1 + \frac{\Delta R_1 + \Delta R_2}{2R_0}} \frac{E_a}{4}$$

$$v_m = \frac{\Delta R}{R_0} \frac{E_a}{4}$$

Capteur type AD22103

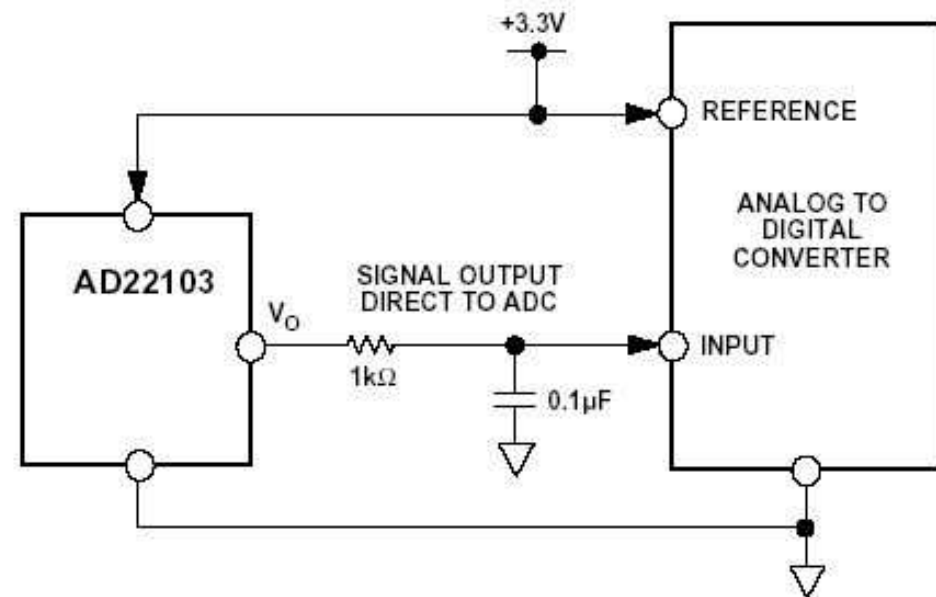
n'exige qu'une tension d'alimentation de 3.3V

La linéarisation est intégrée : la tension de sortie est proportionnelle à la T° , de 0.25 V (0°C) à +3.05 V ($+100^\circ\text{C}$).



FEATURES

- 3.3 V, Single Supply Operation
- Temperature Coefficient of 28 mV/ $^\circ\text{C}$
- 100 $^\circ\text{C}$ Temperature Span (0°C to $+100^\circ\text{C}$)
- Accuracy Better Than 2.5% of Full Scale
- Linearity Better Than 0.5% of Full Scale
- Output Proportional to Temperature $\times V_S$
- Minimal Self-Heating
- High Level, Low Impedance Output
- Reverse Supply Protected



2.3. Capteurs inductifs et capacitifs

2.3.1. Capteurs inductifs

Ces capteurs comportent des enroulements de mesure traversés par un flux d'induction magnétique fonction du mesurande. Le mesurande peut être une position, un déplacement linéaire ou angulaire.

Certains de ces capteurs font jouer le coefficient d'auto-induction d'une bobine traversée par un courant alternatif : on déplace par exemple le noyau de la bobine. Les variations obtenues ne sont pas linéaires avec le déplacement.

D'autres capteurs inductifs font appel à 2 bobinages, dont on fait varier le couplage par déplacement du noyau par exemple. Ces capteurs sont sources de tension car on mesure la tension produite dans le secondaire.

2.3.2. Capteurs capacitifs

Ces capteurs font appel à un condensateur plan ou cylindrique.

Rappel :

$$C = \epsilon_r \epsilon_a A / d$$

avec

ϵ_r la permittivité du milieu, ϵ_a celle du vide (= $8.85 \cdot 10^{-12}$ uSI) et A l'aire des armatures en regard et d la distance qui les sépare.

Pour un condensateur cylindrique,

$$C = 2\pi \epsilon_r \epsilon_a l / \ln(r_2/r_1)$$

Avec r_2 et r_1 respectivement les rayons intérieur de l'armature externe et extérieur de l'armature interne, et l leur longueur.

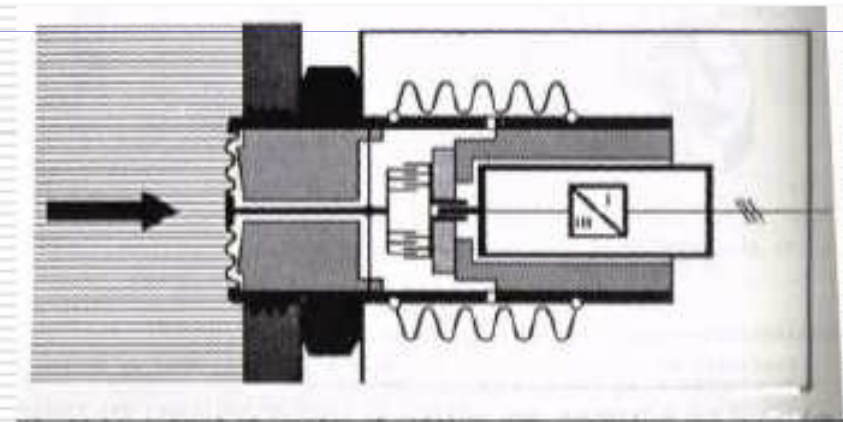
On peut donc faire varier la permittivité du milieu qui sépare les armatures ou la distance qui les sépare.

- Capteurs avec modifications dimensionnelles :
 - capteurs de pression acoustique : ce sont tous les micros capacitifs
 - capteurs de pression de fluide (absolue, relative ou différentielle)
 - capteurs de force ou de pression (mécanique): jauges d'extensométrie capacitives.
- Capteurs avec modification de la permittivité :
 - capteurs de température
 - capteurs d'hygrométrie
 - capteurs chimiques

- Capacité d'un condensateur plan
- Cylindrique
- Modification de la permittivité
 - Température
 - Hygrométrie
 - Niveau de liquide isolant
- Modification de la géométrie
 - Pression (microphone)
 - Pression de fluide - membrane
 - Déformation de solide (jauge extensométrique)

$$C = \epsilon_r \epsilon_0 \frac{S}{e}$$

$$C = 2\pi\epsilon_r\epsilon_0 \frac{L}{\ln(r_2/r_1)}$$



Exemple de capteur de pression avec conversion par variation de capacité (Doc. VEGA).

Exemple de capteur capacitif : les humidistances

Plusieurs procédés existent : le diélectrique peut être une couche mince d'alumine, entre 2 électrodes en aluminium par exemple. La variation d'impédance est fonction seulement de la pression partielle de vapeur d'eau et est indépendante de la température.

D'autres utilisent une couche mince de polymère (quelques microns) sur une plaque reliée à 2 électrodes. La couche mince absorbe les molécules d'eau de l'air ambiant, provoquant une modification de sa constante diélectrique.

La variation de capacité suit une loi assez linéaire avec le taux d'humidité relative.

Exemple : humidistance Philips

Capteur capacitif d'humidité relative

constitué d'une membrane non conductrice recouverte d'une fine pellicule d'or. L'usage de l'or (ou du chrome) permet de créer des fissures dans la membrane pour rendre le temps de réponse indépendant de l'épaisseur, et aussi pour rendre le capteur insensible à certaines agressions chimiques.



EM : 10 à 90% HR (ou 10 à 100%).

Capacité à 25 °C, 43% d'HR et 100 KHz : 122 pF +/-15%.

Sensibilité : 0.4 pF/% HR (+/- 0,05 pF) entre 33 et 43 % d'HR

Gamme de fréquence : 1 kHz à 1 MHz.

Alimentation maxi : 15 Vcc.

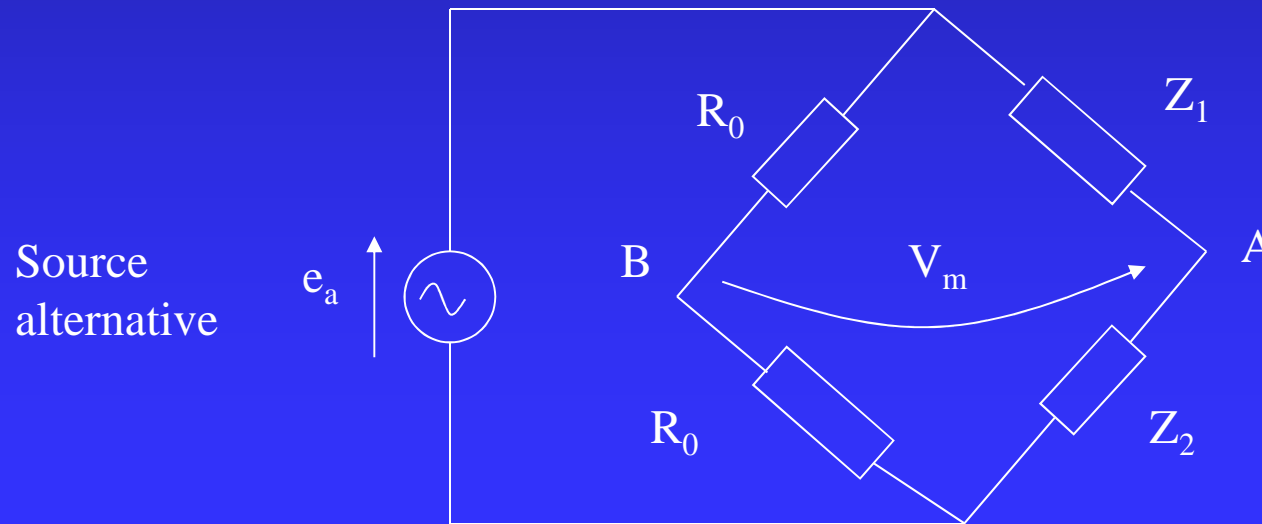
Gamme de température : 0 à 85 °C.

2.3.3. Conditionneurs pour capteurs réactifs

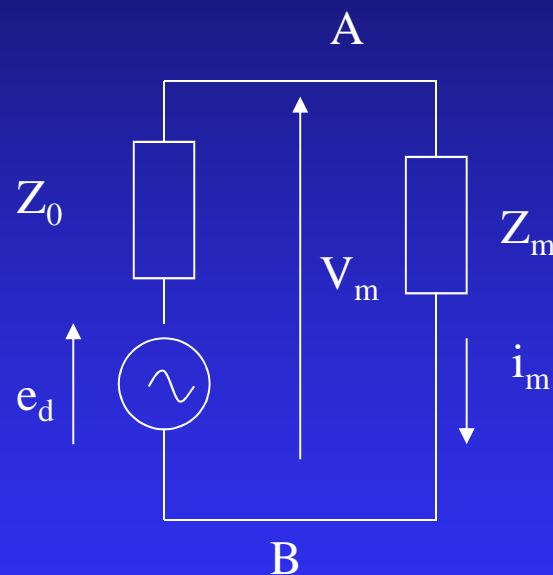
L'information associée à la valeur de l'impédance d'un capteur réactif peut être transférée

- sur l'amplitude d'une tension par un pont d'impédances,
- sur la fréquence d'un signal par l'intermédiaire d'un oscillateur.

- Pont d'impédances



On peut montrer que le schéma précédent est équivalent au schéma de Thévenin suivant :



avec :

$$e_d = (Z_2 - Z_1) / (Z_1 + Z_2) \cdot e_a / 2$$

tension en circuit ouvert

$$Z_0 = (Z_1 Z_2) / (Z_1 + Z_2) + R_0 / 2$$

impédance interne

$$i_d = e_d / Z_0 = (Z_2 - Z_1) / [(Z_1 + Z_2) R_0 + 2 Z_1 Z_2] \cdot e_a$$

courant de court-circuit

Si l'impédance de l'appareil de mesure branché entre A et B est Z_m , On choisira une mesure de tension ou de courant en fonction des valeurs d'impédance que l'on mesure :

En effet, de manière évidente :

$$V_m = Z_m / (Z_m + Z_0) \cdot e_d$$

$$I_m = 1 / (Z_m + Z_0) \cdot e_d$$

Puisqu'il faut que la mesure soit indépendante de Z_m , on choisira :

- une mesure de tension quand $Z_0 \ll Z_m$

$$\text{ainsi } v_m = e_d$$

C'est le cas des capteurs inductifs : Z_0 est de l'ordre du $k\Omega$ (ex. 30 mH à 10kHz)

- Une mesure de courant quand $Z_0 \gg Z_m$

$$\text{ainsi } i_m = i_d$$

C'est le cas des capteurs capacitifs : Z_0 est de l'ordre de $100k\Omega$ (ex. 100 pF à 10kHz). On fait suivre généralement d'un convertisseur courant/tension.

- Par oscillateur

L'oscillateur permet de transférer l'information liée à la valeur de l'impédance, sur la fréquence des oscillations.

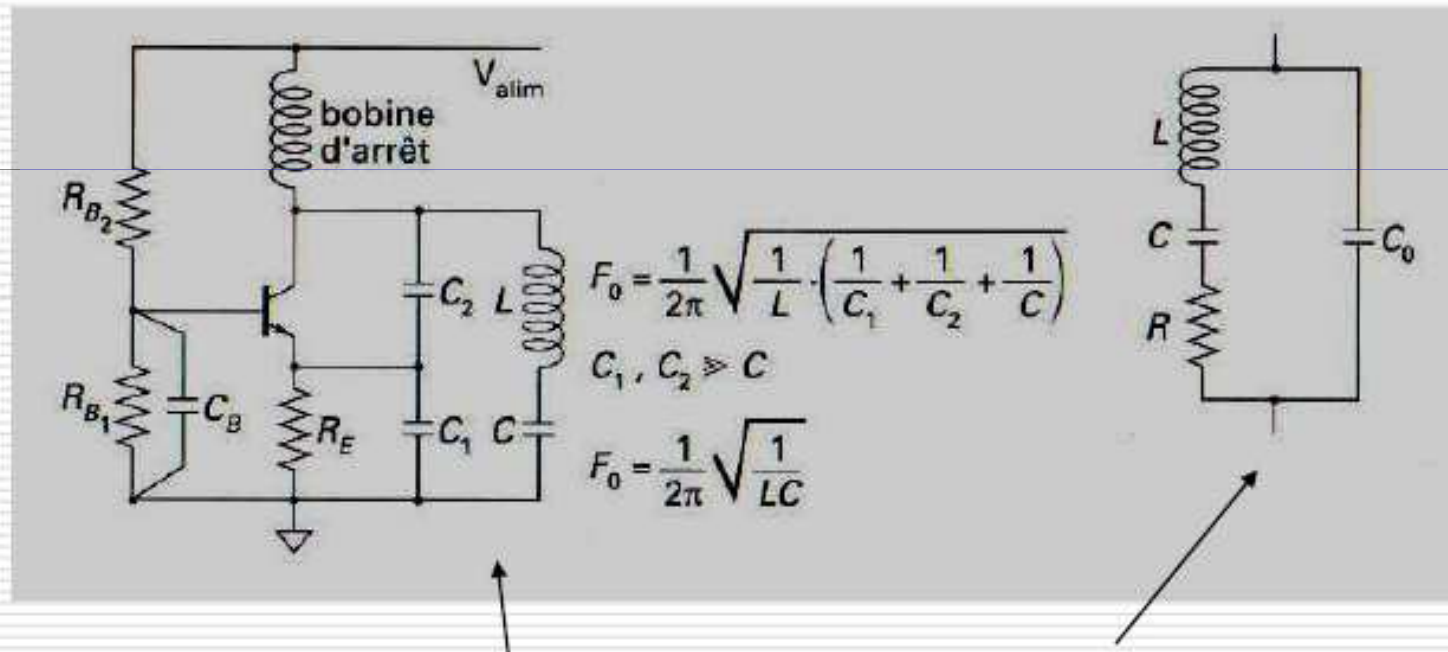
Avantages :

- Immunité aux parasites supérieure
- Conversion sous forme numérique simple : comptage de périodes pendant un temps déterminé
- Le signal modulé en fréquence peut être transmis sans fil.

On utilise le plus souvent des oscillateurs de relaxation, dont la fréquence dépend d'un produit RC avec C la capacité à mesurer.

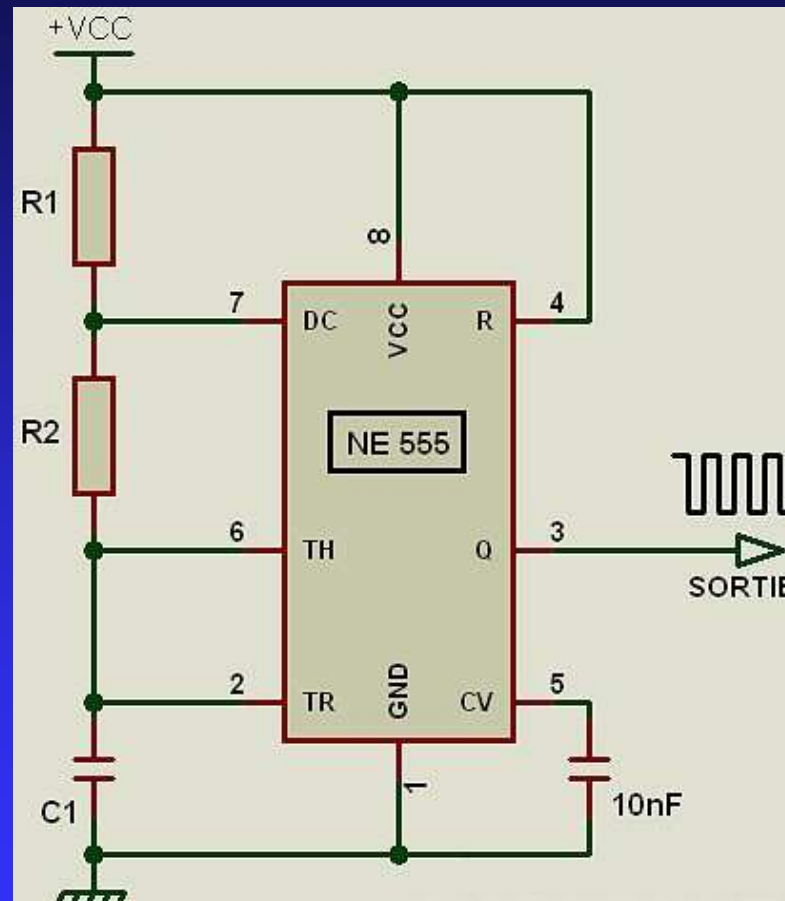
Oscillateurs

- Convertir le signal utile en fréquence
 - Meilleure immunité aux parasites
 - Numérisation aisée (comptage)
 - Télétransmission possible



Oscillateur Clapp et quartz piézoélectrique

Un circuit très classique...



Capteur capacitif

Comptage

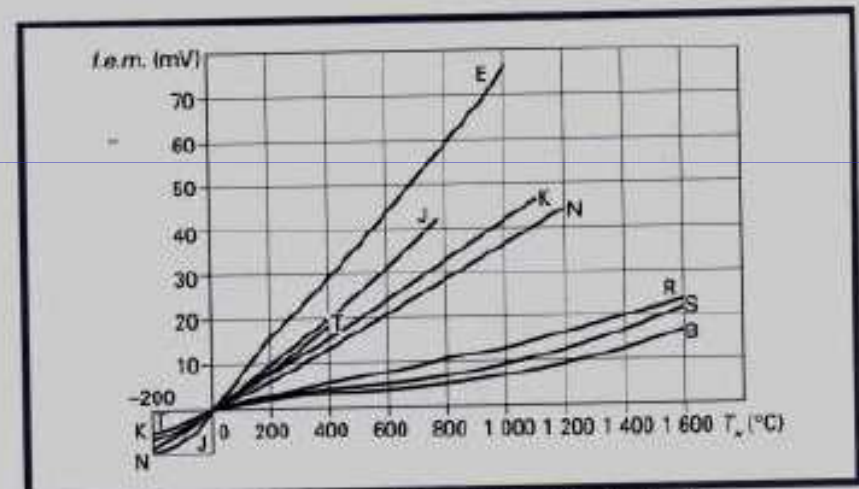
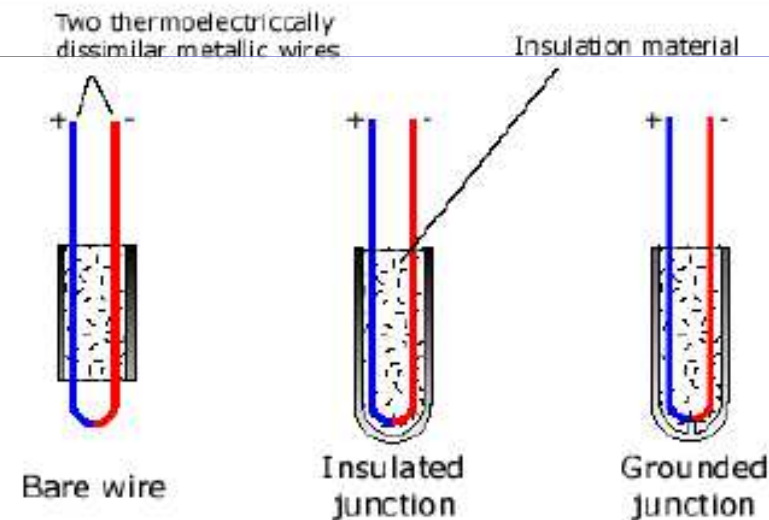
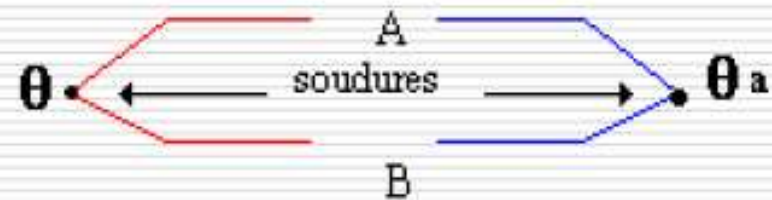
Capteurs de température

Thermocouples: lois physiques

- **Effet Peltier**: à la jonction de deux conducteurs A et B différents mais à même température apparaît une fem
- **Effet Thomson**: entre deux points M et N à température différente au sein d'un même métal homogène apparaît une fem
- **Thermocouple**: effet Seebeck = Peltier+thomson

Thermocouples: génèrent une fem

- Deux conducteurs différents, dont au moins un est un alliage, mis en contact



- E Chromel (nickel-chrome)/Constantan (cuivre-nickel)
- J Fer/Constantan
- K Chromel/Alumel (aluminium-nickel)
- T Cuivre/Constantan
- R Platine-rhodium (13 %)/platine
- S Platine-rhodium (10 %)/platine
- B Platine-rhodium (30 %)/platine-rhodium (6 %)
- N Nicrosil (nickel-chrome-silicium)/Nisil (nickel-silicium)

Thermocouple – Lois – compensation de soudure froide

- ❑ Lois des températures successives
- ❑ Lois des métaux successifs
- ❑ Lois des métaux intermédiaires: **prolongateur**

Compensation de soudure froide

- On compense la température ambiante
- Electriquement
- Avec une sonde de température locale+logiciel

